

Titre: Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière
Title:

Auteur: Marc-André Tessier
Author:

Date: 2015

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Tessier, M.-A. (2015). Développement d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1957/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1957/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Catherine Morency, & Nicolas Saunier
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'ANALYSE ET DE SUIVI
DE LA CONGESTION ROUTIÈRE

MARC-ANDRÉ TESSIER

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

NOVEMBRE 2015

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS D'ANALYSE ET DE SUIVI
DE LA CONGESTION ROUTIÈRE

présenté par : TESSIER Marc-André

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. TRÉPANIÉ Martin, Ph. D., président

Mme MORENCY Catherine, Ph. D., membre et directrice de recherche

M. SAUNIER Nicolas, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

Mme SIOUI Louiselle, Ph. D., membre

DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à Toyota Echo bleu 2002.

Ton sacrifice du 28 mai 2014 m'a ouvert les yeux.

Sans toi je n'aurais pas pu écrire ces lignes.

Je me souviens

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord à remercier ma directrice de maîtrise, Catherine Morency, pour sa confiance, ses idées et pour les innombrables opportunités que j’ai eues grâce à elle tout au long de mes études. Merci de m’avoir transmis cette passion pour le domaine des transports.

Je tiens également à remercier mon codirecteur, Nicolas Saunier, pour sa générosité et ses précieux conseils. Merci pour toutes les discussions passionnées sur les données ouvertes et les véhicules autonomes.

Je souhaite également remercier tous mes collègues de Polytechnique Montréal et de l’extérieur qui ont contribué de près comme de loin à mon parcours à la maîtrise. Merci spécialement à Jean-Simon Bourdeau, Gabriel Sicotte, Philippe Gaudette, Alexis Frappier, Annick Lacombe, Philippe Fortin, Charles Poitras, Kinan Bahbouh, Pegah Nouri, Hamzeh Alizadeh, Davood Zall, Yan Guillemette, Louiselle Sioui, Pierre-Léo Bourbonnais, Julien Faucher, Farhana Yasmin, Martin Trépanier, Robert Chapleau, et Hubert Verreault.

Je souhaite aussi remercier le MTQ pour le financement, l’accès aux données et les contributions à ce projet de recherche, ainsi que Taxi Diamond pour l’accès à leurs données. Je remercie également le CRSNG, Hydro-Québec, la Fondation de l’ATC et le GRTC pour le soutien financier, ainsi que le FRQNT et Michael L. Pack pour l’opportunité de stage au CATT Lab.

Merci à mes parents, ma famille et à mes amis de longue date pour leur support depuis le début et pour leur intérêt par rapport à mes recherches.

Je termine en remerciant du fond du cœur ma copine, Sarah-Fei, pour son soutien moral et sa grande compréhension tout au long de cette aventure. Nous en ressortons grandis tous les deux.

RÉSUMÉ

La congestion routière est devenue l'enjeu numéro un dans les régions métropolitaines en raison de ses multiples incidences sur la population, l'environnement et l'économie. Il est évident qu'il faut poursuivre les recherches afin de réduire la congestion. La première étape est de se doter d'outils pour la mesurer. Ce projet de recherche vise à développer des indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière. Quatre objectifs spécifiques sont également poursuivis :

1. Mieux comprendre la congestion pour en dégager une définition et les variables pertinentes;
2. Identifier des indicateurs de la congestion adéquats pour différents objets et conditions du réseau routier à des fins de planification et suivi;
3. Développer une méthodologie d'estimation des indicateurs identifiés à partir de données de vitesse de traces GPS;
4. Contribuer au développement d'un outil de consultation permettant d'extraire des statistiques utiles aux analyses de suivi et d'estimer des modèles explicatifs de la congestion.

Premièrement, une revue de littérature étudie les différents paramètres (définitions, seuils d'acceptabilité, causes, impacts, solutions, « bénéfiques » et mesures) liés à la congestion routière et propose une définition qui tient compte de tous les paramètres pertinents : *La congestion routière est un phénomène physique et relatif qui survient lorsque les paramètres de la circulation (volume, vitesse et dérivés) deviennent moins désirables que les valeurs de référence fixées et qui varie selon le temps, l'espace, la cause (récurrente et incidente) et le seuil d'acceptabilité.* La revue de littérature permet également d'identifier une liste de 24 indicateurs adéquats pour l'évaluation de la congestion selon six catégories : vitesse, débit et capacité, temps et retard, spatiaux, fiabilité et coûts. De ces indicateurs, les plus simples sont choisis dans un intérêt de développement méthodologique.

Deuxièmement, une méthodologie d'estimation d'indicateurs de la congestion à partir de données de traces GPS est développée. Cette méthodologie comprend le traitement des données de mesure (données de vitesses provenant de traces GPS de la flotte de Taxi Diamond), de réseau (réseau sous la juridiction du MTQ segmenté au 100 m) et explicatives (données météorologiques) et la fusion de ces données pour former une base de données permettant de calculer des indicateurs selon plusieurs objets de visualisation et sélections spatiotemporelles. Les équations des indicateurs choisis, les

hypothèses d'un seuil d'acceptabilité de la congestion et la méthodologie de création des objets de visualisation sont décrites.

Troisièmement, la méthodologie développée est appliquée pour évaluer des indicateurs de la congestion routière selon différents objets d'étude et de visualisation pertinents pour le développement d'un outil d'analyse et de suivi de la circulation. Trois objets d'étude sont utilisés, soit le corridor de l'autoroute 40 sur l'île de Montréal, l'accès au Pont Champlain en direction de Montréal et le réseau routier de la région de Montréal en entier. L'évaluation des indicateurs est réalisée en utilisant quatre objets de visualisation (distribution, courbe cumulée, grille de congestion et carte de congestion) et sept indicateurs (vitesse moyenne, ratio de la limite de vitesse, temps de parcours moyen et cumulé, retard moyen et cumulé et pourcentage en congestion). Cela a permis d'analyser adéquatement la variation des conditions de circulation pour les trois objets identifiés et de valider la méthodologie de développement d'indicateurs proposée.

Finalement, une méthodologie d'évaluation des impacts des conditions météorologiques sur les conditions de circulation est présentée. L'étude de cas porte sur les autoroutes de la région de Montréal, durant les mois de février et mars, pour se concentrer sur les variables hivernales (chaussée glacée et chute de neige). Plusieurs modèles LOGIT de la probabilité de l'occurrence de la congestion sont estimés avec le logiciel R en incluant différentes variables : les périodes horaires (regroupées en utilisant le test de Kolmogorov-Smirnov), la région et les attributs météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). Cela a permis de conclure que les conditions météorologiques ont un impact sur la probabilité de congestion et que la méthodologie employée est adéquate pour être intégrée à un outil de consultation à Montréal.

En conclusion, ce projet de recherche a permis de développer une méthodologie d'estimation d'indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière identifiés dans la littérature pour différents objets et conditions du réseau routier à partir de données de vitesse de traces GPS dans l'optique de contribuer au développement d'un outil de consultation pour la région de Montréal.

ABSTRACT

Road congestion has become the number one issue in metropolitan areas. It decreases the quality of life and generates negative impacts on the environment and the economy. It is evident that continuous research to reduce congestion is needed and the first step is to develop tools to measure it. This research project aims to develop road congestion analysis and monitoring indicators. Four specific objectives are pursued:

1. Better understand road congestion to identify a clear definition and relevant variables;
2. Identify appropriate road congestion indicators for different objects and conditions of the road network for planning and monitoring purposes;
3. Develop a methodology for estimating the identified indicators using GPS traces speed data;
4. Contribute to the development of a consultation tool able to extract useful statistics for follow-up analyzes and to estimate descriptive models of congestion.

First, a literature review examines the various parameters (definitions, acceptability thresholds, causes, impacts, solutions, "benefits" and measures) related to road congestion and proposes a definition that takes into account all relevant parameters: *Road congestion is a physical and relative phenomenon that occurs when the traffic parameters (volume, speed and derivatives) become less desirable than the established reference values and which varies according to time, space, the cause (recurrent and incident) and the acceptability threshold.* The literature review also identifies a list of 24 indicators for the assessment of congestion sorted in six categories: speed, flow and capacity, time and delay, spatial indicators, reliability and costs. Simple indicators were selected from this list since the focus is on the development of a methodology.

Second, a methodology for estimating road congestion indicators from GPS traces speed data is developed. This methodology includes the processing of the measurement data (speed data derived from GPS traces of the Taxi Diamond fleet), the network data (MTQ road network divided in equal segments of 100m) and explanatory data (road weather data), and the merging of these datasets to form a database to calculate indicators according to several visualization objects and spatiotemporal selections. The equations of the chosen indicators, the assumptions regarding a congestion acceptability threshold and the methodology used to create the visualization objects are described.

Third, the developed methodology is applied to estimate road congestion indicators on different study objects and visualization objects that are relevant for developing a traffic analysis and monitoring tool. Three objects of study are used: the Highway 40 corridor on the island of Montreal, as well as the Champlain Bridge access towards Montreal and the entire road network of the Montreal region. The indicator evaluation is carried out using four visualization objects (distribution, cumulative curve, congestion grid and congestion map) and seven indicators (average speed, speed limit ratio, average and cumulative travel time, average and cumulative delay, and percentage in congestion). This allowed to adequately analyze the traffic conditions variations for the three identified objects and validate the indicators development methodology proposed.

Finally, a methodology for evaluating the impacts of road weather conditions on the traffic conditions is presented. The case study covers the Montreal area highways during the months of February and March, to focus on winter variables (icy roads and snowfall). Several LOGIT models of the probability of congestion are estimated using the R software including different variables: hourly periods (grouped using the Kolmogorov-Smirnov test), the region and road weather attributes (road condition, type of precipitation and visibility). It concluded that the road weather conditions have an impact on the probability of congestion and that the methodology is adequate to be part of a consultation tool for Montreal.

In conclusion, this research project has developed a methodology to estimate road congestion analysis and monitoring indicators identified in the literature for different objects and conditions of the road network using speed data from GPS traces in order to contribute to the development of a consultation tool for the Montreal region.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
LISTE DES ANNEXES	XVIII
PRÉFACE.....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique.....	3
1.3 Objectifs	4
1.4 Organisation du mémoire	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 La congestion routière	5
2.1.1 Définitions.....	5
2.1.2 Seuils d'acceptabilité de la congestion.....	7
2.1.3 Causes de la congestion.....	9
2.1.4 Impacts de la congestion	12
2.1.5 Solutions à la congestion.....	12
2.1.6 « Bénéfices » de la congestion	14
2.1.7 Mesure de la congestion	14
2.1.8 Synthèse	15
2.2 Indicateurs de la congestion routière.....	16

2.2.1	Notion d'indicateur	16
2.2.2	Historique de l'utilisation des indicateurs	17
2.2.3	Indicateurs de vitesse	19
2.2.4	Indicateurs de débit et de capacité.....	20
2.2.5	Indicateurs de temps et de retard.....	22
2.2.6	Indicateurs spatiaux.....	24
2.2.7	Indicateurs de fiabilité.....	26
2.2.8	Indicateurs de coûts.....	28
2.2.9	Synthèse	30
2.3	Synthèse générale.....	31
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS	32
3.1	Données de mesure : Données de vitesse d'une flotte de taxi	33
3.1.1	Description des données GPS de Taxi Diamond	34
3.1.2	Nettoyage des données GPS.....	35
3.1.3	Synthèse	39
3.2	Données de base : « Réseau du MTQ à Montréal »	39
3.2.1	Définition du « Réseau du MTQ à Montréal ».....	40
3.2.2	Segmentation du réseau en tronçons égaux de 100 m.....	44
3.2.3	Codification des limites de vitesse sur le réseau	47
3.2.4	Synthèse	50
3.3	Appariement des données GPS et du réseau routier	50
3.3.1	Critère de distance ≤ 12 m.....	51
3.3.2	Critère d'azimut à $\pm 15^\circ$	52
3.3.3	Synthèse	53
3.4	Données explicatives : données météorologiques.....	53
3.4.1	Description de la base de données météorologiques.....	54
3.4.2	Conversion vers une base de données temporelle	56
3.4.3	Intégration des données météo aux données de circulation	57
3.5	Calcul des indicateurs.....	58

3.5.1	Équations des indicateurs	59
3.5.2	Seuil d'acceptabilité de la congestion	59
3.6	Objets de visualisation	61
3.6.1	Distribution.....	62
3.6.2	Courbe cumulée.....	62
3.6.3	Grille de congestion	65
3.6.4	Carte de congestion	65
3.7	Agrégation des données selon la sélection spatiotemporelle	66
3.7.1	Sélections spatiotemporelles	66
3.7.2	Taille de l'échantillon disponible.....	67
3.7.3	Algorithme de validation du nombre d'observations	70
3.7.4	Lissage spatial par moyenne mobile	71
3.8	Synthèse	72
CHAPITRE 4	ÉVALUATION D'INDICATEURS DE LA CONGESTION ROUTIÈRE.....	73
4.1	Objets d'étude	73
4.1.1	Corridor : Autoroute 40 sur l'île de Montréal	74
4.1.2	Point d'accès : Pont Champlain en direction de Montréal	75
4.1.3	Réseau routier du MTQ de la région de Montréal	79
4.2	Distribution.....	81
4.2.1	Vitesse moyenne sur l'autoroute 40	81
4.2.2	Temps de parcours moyen sur l'autoroute 40	82
4.2.3	Temps de parcours moyen et cumulé « entre les deux 15 ».....	83
4.2.4	Vitesse moyenne à l'approche du Pont de l'Île-aux-Tourtes	84
4.3	Courbe cumulée.....	85
4.3.1	Temps de parcours cumulé à l'approche du Pont Champlain	85
4.3.2	Retard cumulé à l'approche du Pont Champlain.....	87
4.4	Grille de congestion	90
4.4.1	Ratio de la limite de vitesse sur l'autoroute 40	90
4.4.2	Ratio de la limite de vitesse à l'approche du Pont Champlain.....	92

4.5	Carte de congestion	94
4.5.1	Pourcentage en congestion sur l'autoroute 40.....	94
4.5.2	Vitesse moyenne à l'approche du Pont Champlain.....	94
4.5.3	Ratio des vitesses sur le réseau complet.....	96
4.6	Synthèse	98
CHAPITRE 5 MODÉLISATION DE L'IMPACT DES CONDITIONS MÉTÉOROUTIÈRES		99
5.1	Contexte	99
5.1.1	Estimation de modèle dans un outil automatisé	99
5.1.2	Motivation	100
5.2	Description de l'étude de cas	101
5.3	Définition du modèle.....	103
5.4	Montage de la base de données de modélisation.....	104
5.4.1	Création des périodes horaires	104
5.4.2	Attributs spatiaux	108
5.4.3	Attributs météorologiques	109
5.4.4	Analyse descriptive	109
5.5	Résultats des modèles.....	111
5.5.1	Impacts relatif des conditions météoroutières sur la congestion.....	111
5.5.2	Effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion.....	115
5.5.3	Effet du seuil de congestion sur la probabilité	116
5.6	Synthèse	118
CHAPITRE 6 CONCLUSION		119
6.1	Synthèse des travaux	119
6.2	Contributions.....	121
6.3	Limitations	121
6.4	Perspectives.....	123
BIBLIOGRAPHIE		125
ANNEXES.....		129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Définitions alternatives de la congestion (adapté de Aftabuzzaman 2007)	6
Tableau 2-2 : Sélection d'indicateurs basés sur la vitesse dans la littérature.....	19
Tableau 2-3 : Sélection d'indicateurs basés sur le débit et la capacité dans la littérature.....	21
Tableau 2-4 : Description des niveaux de service du Highway Capacity Manual (TRB, 2010) ...	21
Tableau 2-5 : Sélection d'indicateurs de temps et de retard dans la littérature.....	22
Tableau 2-6 : Sélection d'indicateurs spatiaux dans la littérature.....	25
Tableau 2-7 : Sélection d'indicateurs basés sur la fiabilité dans la littérature	26
Tableau 2-8 : Sélection d'indicateurs basés sur les coûts dans la littérature.....	29
Tableau 3-1 : Description de la table des données GPS de la flotte de Taxi Diamond.....	39
Tableau 3-2 : Règles d'affectation de la direction de la route selon le RTSS.....	46
Tableau 3-3 : Description de la table de données des tronçons de 100 m du réseau routier utilisés pour ce projet.....	50
Tableau 3-4 : Variables météorologiques d'intérêt identifiées pour le projet.....	55
Tableau 3-5 : Définition du code d'État de la chaussée et du code WMO 4680	56
Tableau 3-6 : Échantillon de la table de données météorologiques temporelle	57
Tableau 3-7 : Équation des indicateurs utilisés	59
Tableau 3-8 : Matrice de connexité de l'approche du Pont Champlain vers Montréal.....	63
Tableau 3-9 : Sélections spatiotemporelles pour calculer les indicateurs de la congestion	67
Tableau 4-1 : Synthèse des objets de visualisation et indicateurs étudiés	98
Tableau 5-1 : Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en février 2014	113
Tableau 5-2 : Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en mars 2014.....	114

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Schématisation des conditions de circulation et de seuils d'acceptabilité de congestion (Inspirée de Hendrik Ammoser, 2007)	8
Figure 2-2 : Sources de la congestion aux États-Unis (Source : FHWA 2005)	10
Figure 2-3 : Instantanées de la vidéo de l'expérience de Siguyama et al. (2008)	11
Figure 2-4 : Grille de congestion du % de la vitesse mesurée sur la vitesse de référence pour les deux directions de l'I-495 aux États-Unis (Source : Lund et Pack, 2010)	20
Figure 2-5 : Sources du retard et réduction potentielle sur l'I-880 Californie selon la direction et l'heure de pointe : (a) Nord AM, (b) Nord PM, (c) Sud AM, and (d) Sud PM (Source : Kwon et al, 2006)	24
Figure 2-6 : Représentation de la durée et la longueur maximale (a) et sa distribution dans le temps (b) de la file d'attente sur le I-80 E à la sortie 43 pour mars 2012 (Source : Pack, 2012)	25
Figure 2-7 : Dérivation des indicateurs de fiabilité à partir de la distribution du temps de parcours (Source : TRB, 2010)	27
Figure 2-8 : Quatre quadrants de l'indice de moyenne-variabilité (IMV) du temps de parcours sur l'A13 en direction sud en pointe AM en 2004 (Source : Loustau et al, 2010)	28
Figure 2-9 : Coûts totaux du retard (voitures et camions) et du CO ₂ émis pour l'I-94 en Indiana selon l'année et la direction (Source : Remias et al, 2012)	30
Figure 3-1 : Schéma de l'organisation du chapitre 3	32
Figure 3-2 : Carte de la densité relative et de l'étendue spatiale des points GPS de Taxi Diamond pour le mois d'octobre 2014	34
Figure 3-3 : Schéma de la définition de l'azimut	36
Figure 3-4 : Azimut maximum des points GPS historiques de Taxi Diamond selon la date	37
Figure 3-5 : Évolution du nombre de points avec un azimut plus grand que 360°	37
Figure 3-6 : Nombre de points selon l'azimut (sauf 0°) pour le mois de juin 2013	38
Figure 3-7 : Carte des territoires des EOD du Grand Montréal (Source : AMT, 2014)	40
Figure 3-8 : Carte des sous-routes classifiées sur le territoire de l'EOD 2008	41
Figure 3-9 : Définition complète de la codification RTSS (Source : MTQ, 2002)	42
Figure 3-10 : Carte des autoroutes (rouge) et routes principales (vert) du MTQ de la région de Montréal avec les panneaux des routes identifiées	43
Figure 3-11 : Cartes des modifications au réseau MTQ entre le fichier « sous-route classifiée » du 28 novembre 2013 (rouge) et du 14 mai 2015 (bleu)	44
Figure 3-12 : Carte des zones de limite de vitesse (km/h) sur le réseau du MTQ telles que codifiées via Google Street View	48

Figure 3-13 : Capture d'écran d'une interface Google Maps avec Google Street View qui affiche un panneau de vitesse sur l'autoroute 40 à Montréal (Source : Google, 2014)	49
Figure 3-14 : Tronçon de l'A40 et les points GPS appariés au réseau au 30 sept. 2013.....	52
Figure 3-15 : Échangeur A40-A13 et les points GPS appariés au réseau au 30 sept. 2013.....	53
Figure 3-16 : Carte des stations météorologiques du MTQ de la grande région de Montréal	54
Figure 3-17 : Schémas de la jointure entre données de circulation et données explicatives.....	58
Figure 3-18 : Schématisation et nomenclature du seuil d'acceptabilité de la congestion.....	61
Figure 3-19 : Chaînages des corridors de l'approche du Pont Champlain vers Montréal	63
Figure 3-20 : Nombre de données de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal de janvier 2012 à septembre 2013	68
Figure 3-21 : Nombre de tronçon-date-heure (TDH) avec des données de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal de janvier 2012 à septembre 2013	69
Figure 3-22 : Algorithme décisionnel lorsque le nombre de données est insuffisant	70
Figure 4-1 : Carte de l'étude de cas de l'autoroute 40 à Montréal.....	75
Figure 4-2 : Illustration d'un échangeur avec trois directions d'autoroute impactées par une source de congestion	76
Figure 4-3 : Types de point d'accès : échangeur et pont.....	77
Figure 4-4 : Carte du Pont Champlain et des autoroutes et routes principales connectées.....	78
Figure 4-5 : Distribution des données GPS pour l'objet d'étude du Pont Champlain	79
Figure 4-6 : Carte du réseau routier du MTQ de la région de Montréal (bleu) avec la densité d'observations (teinte de rouge) pour le mois d'octobre 2014 (minimum de 5 observations)	80
Figure 4-7 : Vitesse moyenne sur l'autoroute 40 par rapport à la limite de vitesse, au seuil de congestion et au 85 ^e centile des vitesses agrégée par tronçon de 100 m.....	81
Figure 4-8 : Distribution du temps de parcours moyen sur l'autoroute 40 selon le jour de la semaine.....	82
Figure 4-9 : Temps de parcours moyen et cumulé sur l'autoroute 40 « entre les deux 15 » en direction ouest selon la période de la journée	83
Figure 4-10 : Variation de la vitesse moyenne hebdomadaire, plus ou moins un écart-type, sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest en semaine en période de pointe AM et PM ...	84
Figure 4-11 : Temps de parcours moyen cumulé pour atteindre la fin du Pont Champlain en semaine.....	86
Figure 4-12 : Temps de parcours moyens cumulés des 8 corridors en pointe AM selon le jour de la semaine.....	87
Figure 4-13 : Temps de parcours moyens cumulés (a) et retards moyens cumulés (b) entre 7h00 et 8h00 à l'approche et sur le Pont Champlain vers Montréal	88

Figure 4-14 : Retard moyen cumulé selon l'heure à l'approche et sur le Pont Champlain vers Montréal en semaine	89
Figure 4-15 : Grille spatiotemporelle du Ratio des vitesses historiques sur l'autoroute 40 de janvier 2012 à septembre 2013.....	91
Figure 4-16 : Grille du ratio de la limite de vitesse sur l'autoroute 10 à l'approche et sur le Pont Champlain à vers Montréal en semaine	93
Figure 4-17 : Tronçons de 100m parmi les 15 % plus congestionnés (en rouge) et pourcentage des tronçons congestionnés selon la période de pointe	94
Figure 4-18 : Cartes des vitesses moyennes à l'approche du Pont Champlain vers Montréal selon l'heure en semaine.....	95
Figure 4-19 : Ratio de la limite de vitesse (RLV) sur l'ensemble du réseau routier en semaine selon la période de pointe, pour les tronçons ayant au moins 5 observations de février 2014 à février 2015	97
Figure 5-1 : Schématisation de la génération automatisée de modèles explicatifs	100
Figure 5-2 : Distribution fréquentielle du temps de parcours selon le jour de la semaine pour le réseau complet du MTQ en février 2014	101
Figure 5-3 : Carte de l'étude de cas : Autoroutes de la région de Montréal (8 régions) avec leur limite de vitesse et la localisation de la station météorologique Ste-Thérèse du MTQ	102
Figure 5-4 : Distribution fréquentielle du ratio de la limite de vitesse (RLV) sur tout le réseau pour février 2014	103
Figure 5-5 : Résultat du test de KS comparant les distributions de 6h et 7h pour mars 2014	105
Figure 5-6 : Matrice des distances D entre les distributions de chaque paire d'heure	106
Figure 5-7 : Création des périodes horaires : Matrice des résultats des tests de KS (a,b) et les distributions fréquentielles du RLV (c,d) pour février et mars	107
Figure 5-8 : Matrice de corrélation des variables utilisées pour février 2014.....	108
Figure 5-9 : Distributions des données du RLV en fonction de toutes les variables explicatives pour le mois de février 2014 (603 037 observations).....	110
Figure 5-10 : Probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour une chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige.....	116
Figure 5-11 : Probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale pour différents seuils de congestion en février (a) et mars (b).....	117

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AM	Avant-midi (la pointe AM est généralement de 6h00 à 9h00 en semaine)
AMT	Agence métropolitaine de transport
BD	Base de données
BGR	Base géographique routière (système de données du MTQ)
CSV	<i>Comma-separated values</i> (format de fichier de données séparées par des virgules)
EC	Environnement Canada
EOD	Enquête Origine-Destination (de la région métropolitaine de Montréal)
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i> (aux États-Unis)
GIS	<i>Geographic information system</i> (SIG en anglais)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (traduction : système de positionnement par satellites)
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i> (guide de conception des autoroutes)
KS	Kolmogorov-Smirnov (le test de KS est un test statistique non-paramétrique)
MAP-21	<i>Moving Ahead for Progress in the 21st Century</i> (loi aux États-Unis)
MOTREM	Modèle de transport urbain pour la région de Montréal (développé par le MTQ)
MTQ	Ministère des transports du Québec
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i> (aux États-Unis)
OR	<i>Odds Ratio</i> (ou rapport des cotes, est une mesure statistique)
PM	Après-midi (la pointe PM est généralement de 15h00 à 18h00 en semaine)
RTSS	Route – Tronçon – Section – Sous-section (codification des routes par le MTQ)
SIG	Système d'information géographique
TCD	Tableau croisé dynamique (outil de Microsoft Excel)
TDH	Tronçon-date-heure (unité spatiotemporelle de base)
TMC	Traffic Message Channel (fait référence à un segment routier)
TTI	Texas Transportation Institute
WMO	World Meteorological Organization

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1	Vision de l’outil d’analyse et de suivi de la congestion.....	129
Annexe 2	Réseau routier détaillé	131
Annexe 3	Prototype de sondage sur la perception de la congestion.....	134
Annexe 4	Résultats détaillés de l’évaluation des indicateurs	136
Annexe 5	Résultats détaillés de la modélisation.....	138

PRÉFACE

« You are not stuck in traffic. You ARE traffic. » - TomTom Satnav Advertisement

La congestion. Au début je ne savais pas si j'avais le goût de faire de la recherche sur les autos. Je m'intéressais plutôt aux alternatives à l'auto individuelle, pas l'auto directement. J'ai dû y repenser, puis finalement je me suis dit que j'étais une personne idéale pour étudier l'auto parce que je l'utilise tout le temps. Je suis de la Rive-Sud. C'est pratiquement un automatisme d'utiliser l'auto. Au magasin, à l'épicerie, au dépanneur et même aller au parc en auto. Et quand on prend l'auto pour se rendre à Montréal, on saute à pieds joints dans « la congestion ».

Participer à la congestion. C'est comme une habitude, c'est « normal », on ne se pose pas la question. Sauf que la congestion nous affecte lorsqu'on est derrière le volant, ça épuise, c'est demandant. Je le sais, j'ai déjà pris l'auto à tous les jours aller-retour entre Saint-Hubert et Polytechnique pendant plus d'un an! Une heure et quart, une heure et demie juste pour l'aller en heure de pointe, donc pratiquement 3 heures par jour dans l'auto! C'est pour ça que maintenant je prends plutôt le transport en commun. C'est moins stressant et je peux mieux utiliser mon temps. Pas ce matin-là.

Causer la congestion. Mercredi, 28 mai 2014. Ce matin-là, c'était différent. Durant la nuit, j'avais de la difficulté à dormir, donc je me suis dit que j'étais bien mieux de me lever et de commencer à travailler. Il était 3h00. J'ai travaillé jusqu'à 9h00 et je me suis dit « faudrait ben que j'aille à l'école là ». Pas que j'étais attendu, je pouvais très bien rester à travailler chez moi, mais c'était « rendu l'heure ». Un bon déjeuner, une bonne douche et je suis parti. Je prends la Echo comme d'habitude pour me rendre au stationnement incitatif Chevrier. Il est 9h20, il ne devrait plus rester trop de trafic, je vais passer par la 30 et on verra. J'écoute la Radio-Circulation et il n'y a rien à signaler sur mon itinéraire. Bof, je vais me rendre à Montréal en auto, c'est plus rapide, le trafic est pas mal fini. Je prends le Pont Champlain, avec sa « super poutre » et ça roule bien, c'est tranquille, c'est juste très monotone, endormant même.

BOUM! Je me réveille! L'auto ne bouge plus. Pourtant je suis encore sur Drive. J'ai un flat? Probablement. Mais pourquoi la vitre est toute brisée? Et le tableau de bord aussi! Ouch, j'ai vraiment mal à la cheville. OK la roue est comme rentrée par en dedans. Ça doit être parce que j'ai

foncé dans le muret du centre?! Je me souviens vraiment de rien! Je regarde autour et ça semble être la seule explication. Je suis sur l'autoroute 15 (aussi la 20 à cet endroit) en direction de Montréal, *collé* sur le muret du centre, juste après l'ancien poste de péage et vis-à-vis le chantier de construction du pont temporaire de l'île des Sœurs. Les voitures me contournent très bien, sans se poser de question. Je ne cause pas trop de congestion. Premier réflexe, j'appelle le 911. Je leur dis que je suis « sur la 10 euh la 15 euh la 20 en tout cas je suis pas sûr ». Ensuite, j'appelle maman, papa, ma blonde pour leur dire que je vais bien. Remorqueur, police et ambulance arrivent, et je ne peux m'empêcher de me demander « comment ils vont codifier ça dans SAGE? » J'imagine que l'information s'est aussi rendue à la Radio-Circulation et sur Twitter pendant ce temps.

Bref, je me rends à l'hôpital, mais je n'ai rien de cassé. C'est seulement la Echo qui y a laissé sa vie. J'ai été très chanceux. Ça aurait pu être pire. Mon hypothèse est je ne roulais pas trop vite dû à la circulation et que je me suis endormi au volant dans la courbe après le poste de péage. On dit que les gens qui s'endorment ont tendance à écraser la pédale¹. J'imagine que j'ai écrasé la pédale de frein, étant dans une courbe. J'aurais donc gentiment dévié vers le muret qui m'a freiné en « crochissant » la roue avant-droite. J'ai été très chanceux. Ça aurait pu être pire. J'aurais pu très bien accélérer, percuter un camion de plein fouet et même tomber dans le vide à cause des constructions. J'aurais pu ne pas écrire ces lignes.

Si j'hésitais au début, maintenant je suis sûr à 100% que c'est le domaine de recherche qui me motive le plus! J'ai toujours dit la même chose, le génie civil c'est probablement le génie le plus humain, et ça me ressemble. Le transport, c'est inévitablement le domaine le plus proche des gens. « Tout le monde a une histoire de transport. » lançait Catherine Morency quand j'ai pris le cours CIV2710, Systèmes de transport, en 2010. Et la congestion, ça touche évidemment tout le monde, de près comme de loin. Je me suis toujours dit que je voulais avoir un impact sur l'ensemble de la société et sur le portrait général de notre quotidien, et que j'avais la réelle ambition de jouer un rôle important dans l'évolution du transport des prochaines années.

Ça vient de commencer.

Bonne lecture!

¹ Tel que mentionné par Etienne Vachon, policier et ami.

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La congestion routière est devenue l'enjeu numéro un dans les régions métropolitaines en raison de ses multiples incidences sur la population, l'environnement et l'économie. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a estimé à 1,85 milliards de dollars les coûts de la congestion routière dans la région métropolitaine de Montréal pour l'année 2008 seulement (Les Conseillers ADEC, 2014). De plus, contrairement à plusieurs problèmes sociaux beaucoup plus importants, comme la pauvreté, la famine, la faible qualité de l'éducation, les sans-abris, la drogue, la congestion routière est directement vécue par des millions de personnes tous les jours, peu importe leur niveau de vie (Downs, 2004). En effet, l'Enquête sociale générale (ESG) de 2010 (Turcotte, 2011) démontre que 67 % des travailleurs automobilistes des grandes régions métropolitaines du Canada expérimentent la congestion au moins un jour par semaine et 30 % tous les jours. Les données de l'ESG 2010 révèlent également que la fréquence de la congestion augmente le niveau de stress des Canadiens.

De plus, selon un sondage pour le compte du MTQ (SOM, 2015), 56 % des personnes habitant la région de Montréal estiment que les routes sont congestionnées et 46 % considèrent la congestion peu ou pas acceptable. Ceux-ci estiment perdre en moyenne 31 minutes par jour en raison de la congestion routière. Peu étonnant de constater que « *Réduire la congestion routière dans les grandes villes* » soit classé au deuxième rang des priorités en transport pour le gouvernement selon les répondants du sondage. La population demande des solutions pour réduire la congestion. Afin de pouvoir gérer la congestion routière, la première étape est de la mesurer à l'aide d'indicateurs d'analyse et de suivi. C'est dans cette optique que s'inscrit cette recherche.

1.1 Contexte

Plusieurs outils sont développés dans le monde pour informer le public des conditions de circulation sur le réseau routier et pour gérer la circulation en temps réel. Ces applications sont certainement intéressantes pour les voyageurs, mais elles n'offrent pas nécessairement les fonctions qui permettraient à des planificateurs d'évaluer l'évolution de la congestion sur différents tronçons, grands corridors ou secteurs, ni de mesurer, à différents horizons et échelles, les impacts de certaines interventions sur le réseau. Toute région métropolitaine souhaite avoir un outil de mesure de la performance de son réseau routier. Aux États-Unis, le gouvernement a adopté la loi

MAP-21 en 2012 qui impose à tous les états de se doter de mesures de performance de leur système de transport (FHWA, 2012). Plusieurs grandes villes américaines profitent maintenant d'outils de mesure et d'analyse des conditions de circulation. Il n'est donc pas étonnant que le MTQ souhaite emboîter le pas.

À l'heure actuelle, il n'existe aucun outil d'analyse et de suivi de la congestion routière au Québec. En 2013, le MTQ a mandaté Polytechnique Montréal de développer un tel outil pour le réseau autoroutier de la région métropolitaine de Montréal. Quatre objectifs principaux ont été identifiés pour cet outil : la calibration des modèles régionaux, l'évaluation des impacts d'une intervention sur le réseau, la modélisation des conditions de circulation et l'évaluation stratégique de la congestion. La vision de l'architecture de l'outil est présentée à l'Annexe 1. Les travaux présentés dans ce mémoire s'inscrivent dans le cadre de ce projet de recherche

Ce projet est la continuité d'un projet d'étude du potentiel de différentes technologies de collecte de données de circulation et d'indicateurs de suivi de la congestion aussi réalisé par Polytechnique de 2007 à 2011. Tout d'abord, Loustau (2009) a travaillé sur la modélisation des temps de parcours avec des données historiques de véhicules flottants du MTQ. Ensuite, ces analyses ont été comparées avec des données GPS de la flotte de véhicules d'autopartage de la compagnie Communauto (Loustau et al, 2010). Des données de capteurs Bluetooth et de bandes vidéo du MTQ ont été utilisées pour estimer le temps de parcours sur différents tronçons (Saunier et Morency, 2011). Finalement, des échantillons de données de circulation de fournisseurs de données telles que INRIX et RealTraffic ont été évalués dans le cadre de ce premier projet (Morency et al, 2011). À la lumière des multiples analyses, Polytechnique Montréal a recommandé l'utilisation de données de traces GPS de flottes de véhicules aux autres sources de données. Les travaux de Sioui (2014) ont également menés à plusieurs expérimentations en utilisant les données GPS de la flotte de Communauto dans le but de tester l'adaptabilité et la sensibilité d'un indicateur d'intensité de la congestion sur les autoroutes de la région de Montréal. Ces travaux ont aussi permis de démontrer que le développement d'un outil d'analyse et de suivi de la congestion est possible avec des données GPS de flotte de véhicules.

1.2 Problématique

L'étude de la congestion routière pose trois enjeux principaux, soit au niveau de la définition de la congestion, au niveau des indicateurs et au niveau des données.

La congestion est un phénomène complexe. Il n'existe aucune définition de la congestion routière universellement acceptée (Downs, 2004). Cette définition varie selon chaque individu et selon le moment, l'endroit et les conditions environnementales. Chaque personne a sa propre définition de la congestion selon sa perception, ses attentes et son niveau de tolérance. Et ces paramètres ne sont pas les mêmes en heure de pointe, durant la nuit, la fin de semaine, sur un pont, une route de campagne, avant une entrevue importante ou en voyage. Il est donc impossible d'avoir une définition qui s'applique pour tout le monde. La problématique est que l'analyse du phénomène nécessite une définition objective.

La congestion est un phénomène qui varie dans le temps et l'espace. Un des enjeux importants est d'identifier des indicateurs suffisamment sensibles pour témoigner adéquatement de cette variabilité selon différents paramètres. Il est idéaliste de penser qu'on puisse développer un seul indicateur synthétique permettant de donner un aperçu global de la performance de l'ensemble du réseau routier. Mesurer correctement un tel phénomène exige plutôt de recourir à une série d'indicateurs. Ceux-ci doivent pouvoir réagir à la fois à la micro-variabilité spatiotemporelle et aux tendances lourdes de la congestion. Aussi, la qualité et l'usage des indicateurs dépendent fortement de la disponibilité des données, du nombre d'observations et de la représentativité de l'échantillon de données.

La congestion est un concept qui évolue dans le temps et l'espace. Les technologies de collecte de données et la disponibilité de ces données aussi. Plusieurs sources de données de mesure de la circulation sont nécessaires pour caractériser complètement la congestion. De plus, de multiples sources de données extérieures doivent être intégrées pour expliquer les variations de ce phénomène. Tout d'abord, parce qu'il implique de nombreux intervenants, simplement l'accès aux données est une problématique. Ensuite, afin de construire une base de données intégrée d'analyse de la congestion, ces ensembles de données doivent être standardisés et mis en relation temporellement et spatialement. Finalement, parce qu'on s'intéresse aux grandes tendances, il y a un enjeu d'actualisation et de conservation de l'historique des données.

Ces problématiques justifient certains objectifs spécifiques de cette recherche.

1.3 Objectifs

Tel que le mentionné dans le titre de ce mémoire, l'objectif principal de ce projet de recherche est de développer des indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière. Quatre objectifs spécifiques sont également poursuivis :

1. Mieux comprendre la congestion pour en dégager une définition et les variables pertinentes;
2. Identifier des indicateurs de la congestion adéquats pour différents objets et conditions du réseau routier à des fins de planification et suivi;
3. Développer une méthodologie d'estimation des indicateurs identifiés à partir de données de vitesse de traces GPS;
4. Contribuer au développement d'un outil de consultation permettant d'extraire des statistiques utiles aux analyses de suivi et d'estimer des modèles explicatifs de la congestion.

1.4 Organisation du mémoire

Ce document est organisé en six chapitres.

Le Chapitre 1, l'introduction, a servi à présenter le contexte dans lequel s'inscrit ce mémoire de recherche, à énoncer la problématique de recherche et à énumérer l'objectif principal et les objectifs spécifiques. Le Chapitre 2, la revue de littérature, répond aux deux premiers objectifs spécifiques en résumant les définitions et différents paramètres de la congestion routière, puis en dressant une liste d'indicateurs de la littérature pertinents pour ce projet. Le Chapitre 3, la méthodologie de développement d'indicateurs, répond au troisième objectif spécifique en décrivant les sources de données utilisées, les méthodologies et hypothèses employées pour développer des indicateurs de la congestion routière à partir de ces données. Le Chapitre 4, l'évaluation d'indicateurs de la congestion routière, répond au quatrième objectif spécifique en utilisant la méthodologie développée pour évaluer la congestion routière à l'aide des indicateurs identifiés selon différents objets d'étude. Le Chapitre 5, la modélisation de l'impact des conditions météorologiques, propose un modèle de probabilité de la congestion qui inclut des variables météorologiques afin de décrire les effets de ces variables sur la circulation. Le Chapitre 6, la conclusion, fait la synthèse du mémoire et présente les limitations et les perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature est divisée en deux volets qui répondent chacun à un objectif spécifique. La première section, intitulée « la congestion routière », dresse un portrait de la littérature traitant de la congestion en vue de dégager une définition de la congestion et d'identifier les variables pertinentes. Elle traite particulièrement des définitions, des seuils d'acceptabilité, des causes, des impacts, des solutions, des « bénéfices » et des méthodes de mesure de la congestion routière. La seconde section, intitulée « indicateurs de la congestion routière », dresse la liste des indicateurs de la littérature afin d'identifier les indicateurs pertinents pour l'analyse et le suivi de la congestion dans la région de Montréal. Les indicateurs sont divisés en six catégories, soit : vitesse, débit et capacité, temps et retard, indicateurs spatiaux, fiabilité, et coûts. Ce chapitre se termine par une synthèse de la revue de littérature.

2.1 La congestion routière

La congestion routière est un phénomène qui a reçu une grande attention dans la littérature. On retrace même des constats concernant la congestion routière jusqu'en Rome Antique où les étroits portiques d'entrées des villes causaient des retards importants (Van Tilburg, 2007). Afin de mieux comprendre la congestion routière, cette section dresse un portrait de la littérature concernant les différents paramètres et variables qui la définissent.

2.1.1 Définitions

Plusieurs définitions de la congestion routière ont été proposées dans la littérature. Par contre, il n'existe aucune définition de la congestion routière universellement acceptée (Downs, 2004). Aftabuzzaman (2007) a examiné les différentes définitions alternatives dans la littérature scientifique et les a regroupées en trois catégories : reliées à la demande et capacité, reliées au retard et temps de parcours et reliées au coût. Le Tableau 2-1 résume certaines définitions de la littérature regroupées selon ces trois catégories. On peut résumer les définitions de ce tableau par : demande > capacité, temps de parcours > normale, vitesse < normale et coûts > normale. Il y a donc un besoin de définir un référentiel pour ces quatre paramètres qui décrivent la congestion. Cette question fait l'objet de la sous-section suivante.

Tableau 2-1 : Définitions alternatives de la congestion (adapté de Aftabuzzaman 2007)

	Définition [traductions libres]	Source
Q/C	La congestion est une situation dans laquelle la demande en termes de débit excède la capacité.	OCDE 2007
Retard	La congestion routière est le temps de parcours ou le retard additionnel par rapport aux conditions normales lorsque les conditions de circulation sont légères ou en écoulement libre.	Lomax et al. 1997
	La congestion est définie comme la situation lorsque la circulation se déplace à des vitesse s sous la vitesse de référence.	Downs, 2004
Coût	La congestion routière fait référence aux coûts additionnels qui résultent de l'interférence entre les usagers de la route.	Litman, 2005.

Le rapport de l'OCDE (2007) suggère que le manque de consensus au niveau des définitions est dû au fait que la congestion est autant un phénomène *physique*, par rapport à la manière dont les véhicules se font obstacle lorsque la demande approche la capacité d'une route, qu'un phénomène *relatif*, par rapport à l'attente de l'utilisateur vis-à-vis la performance du système routier. La Federal Highway Administration définit la congestion routière comme « le niveau auquel la performance du système de transport n'est plus acceptable [traduction libre] » (Bertini, 2006). Cette dernière définition est reliée au niveau d'acceptabilité de la congestion, qui n'est pas non plus commune à tous, et qui fait l'objet de la prochaine sous-section.

Il est important d'employer le terme *congestion routière*, puisqu'il existe plusieurs formes de *congestion* dans la langue française. Une définition du Larousse est plus inclusive : « État d'un lieu de passage, d'un réseau qui est fortement encombré »². Ainsi, que ce soit un réseau du corps humain, un réseau de télécommunication ou un réseau de transport, l'élément clé de cette définition du Larousse est *fortement encombré*. Au-delà du routier, les réseaux de transport pédestres, cyclistes, aériens, ferroviaires et maritimes et leurs terminaux peuvent aussi subir une congestion. Pour les fins de ce mémoire, le mot *congestion* signifie *congestion routière*.

En résumé, la congestion routière n'a pas de définition arrêtée, mais plutôt plusieurs définitions nuancées, selon plusieurs paramètres : débit et capacité, retard, vitesse, coût, référentiel et niveau acceptable. La définition est une dualité entre la réalité mesurée et la perception des usagers.

² <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/congestion/18188>

2.1.2 Seuils d'acceptabilité de la congestion

Malgré toutes les recherches sur le sujet, la notion de « seuil de la congestion » ou de « niveau acceptable de la congestion » est une notion qui ne fait pas consensus dans la littérature. Lomax et al. (1997) établissent que la congestion devient inacceptable lorsque le temps de parcours ou le retard dépasse une norme acceptée par la collectivité, norme qui varie selon les quatre éléments suivants : le type d'infrastructure de transport, le mode de transport, le lieu géographique, la période de la journée. Évidemment, l'acceptabilité de la congestion est différente lorsqu'elle survient sur un pont urbain en heure de pointe, par rapport à une autoroute interurbaine durant la nuit.

Bertini (2006) a conduit un sondage informel auprès d'experts du domaine du transport en posant la question « Comment définissez-vous la congestion métropolitaine ? ». Certaines réponses réfèrent à une mesure (temps, vitesse, débit, niveau de service), d'autres à un seuil (sous la limite de vitesse, sous 35 mph, 5 minutes d'arrêts à un même endroit) et d'autres à la perception (« la congestion est relative », « je le sais quand je le vois »).

Robitaille (2003) a utilisé les seuils suivants pour caractériser un véhicule dans une file d'attente sur une autoroute du MTQ : 25 km/h (vitesse d'entrée dans la file) et 60 km/h (vitesse de sortie de la file), c'est-à-dire que le véhicule entre en état de congestion lorsque sa vitesse diminue et passe sous 25 km/h et reste dans cet état jusqu'à ce que sa vitesse dépasse 60 km/h dans une zone de 100 km/h. Ces deux seuils pourraient être utilisés pour définir ce qu'est la « congestion acceptable », par exemple : congestion sous 25 km/h, ralentissement non-acceptable entre 25 km/h et 60 km/h, ralentissement acceptable entre 60 km/h et 100 km/h (voir Figure 2-1). Par contre, Bill Eisele du Texas Transportation Institute (Eisele et al. 2015) suggère qu'on devrait utiliser uniquement la vitesse à écoulement libre comme seuil de non-congestion, puisqu'un pourcentage (ex : 60 %) de la vitesse de référence rend la congestion trop subjective. Le Texas Transportation Institute calcule la vitesse à écoulement libre en utilisant le 85^e centile de la vitesse mesurée sur un tronçon routier (TMC) durant la nuit (de 22h à 5h), valeur qui est bornée à un maximum de 65 mph sur les autoroutes (Schrank et al. 2012).

L'objectif d'un seuil d'acceptabilité de la congestion est de définir une cible à atteindre pour les gestionnaires de réseau. Ainsi, c'est aux décideurs de définir les seuils qu'ils considèrent acceptables sur leur réseau. Par contre, cette décision reste très subjective. Évidemment, la détermination de ces seuils sera un élément important en vue de l'évaluation des indicateurs de la

congestion. La Figure 2-1 inspirée d'Ammoser schématise la relation entre les différentes conditions de circulation et les seuils d'acceptabilité de la congestion en reprenant les principes de la théorie de la circulation.

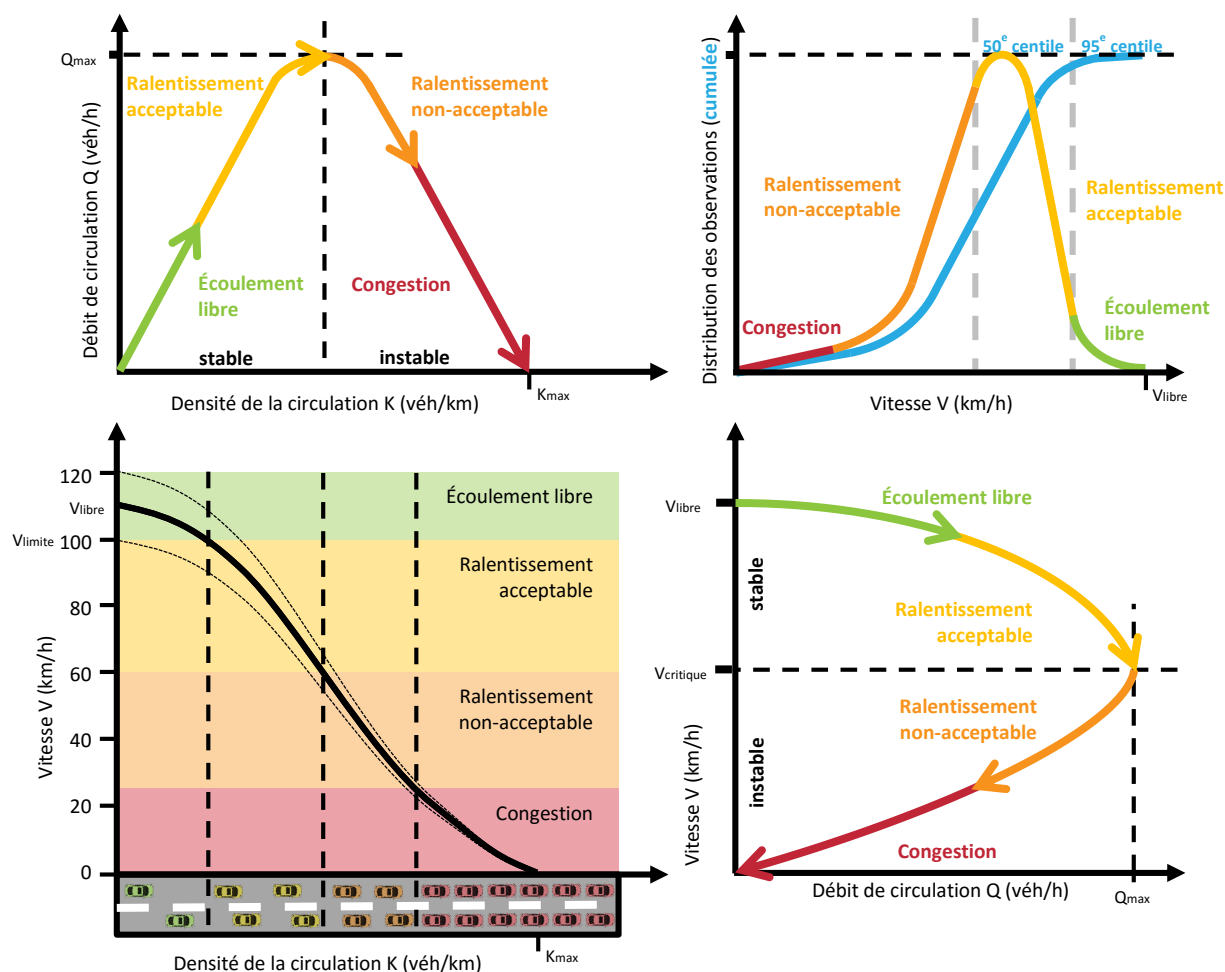


Figure 2-1 : Schématisation des conditions de circulation et de seuils d'acceptabilité de congestion (Inspirée de Hendrik Ammoser, 2007)

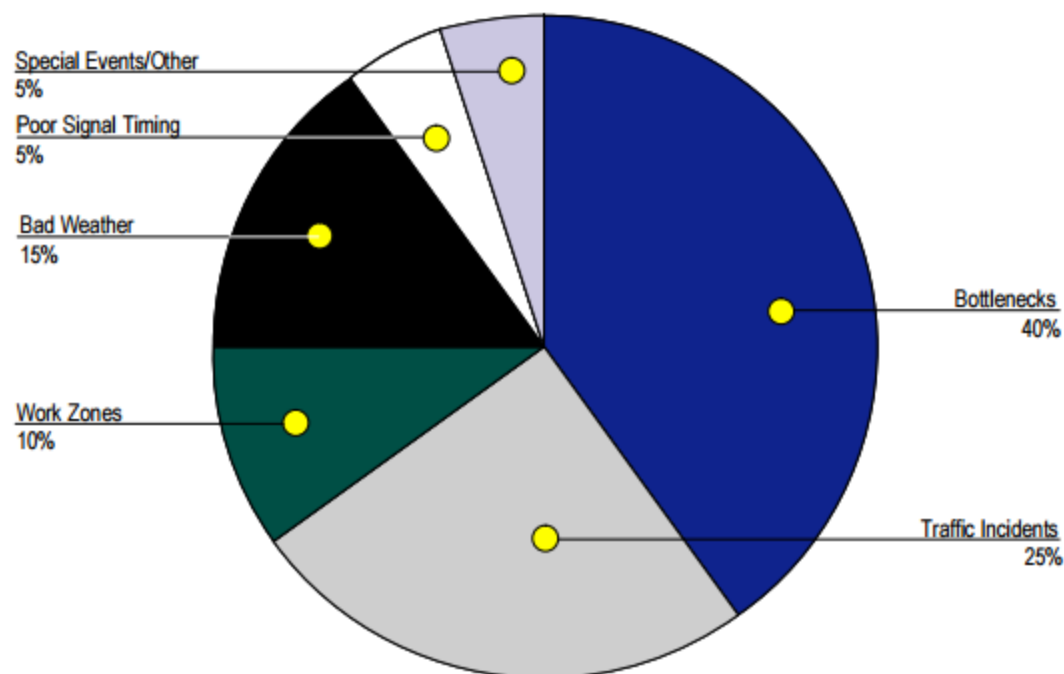
En résumé, il existe plusieurs seuils d'acceptabilité de la congestion dans la littérature, sans toutefois qu'il n'y ait consensus. Ce niveau d'acceptabilité varie selon plusieurs paramètres et l'opinion des experts de transport. Certains utilisent un pourcentage d'une valeur cible, d'autres proposent d'utiliser directement une valeur cible. Le schéma de la Figure 2-1 tente de résumer les nombreuses possibilités de seuils de vitesse : limite de vitesse, vitesse critique, centile de la distribution des vitesses, pourcentage de vitesse, différence des vitesses. En bout de ligne, le choix du seuil doit revenir à l'analyste, ou à l'opérateur de réseau, selon la situation étudiée.

2.1.3 Causes de la congestion

La congestion est principalement causée par un débit de véhicules plus grand que la capacité du réseau routier, soit à cause d'une augmentation de la demande, soit à cause d'une réduction de la capacité routière (goulot³). Les causes sont typiquement catégorisées comme récurrente ou incidente. La congestion récurrente est principalement due à un goulot permanent ou géométrique (diminution du nombre de voies, bretelle d'entrée), tandis que la congestion incidente est plutôt due à un goulot temporaire ou inattendu (météo, accidents, travaux, signalisation, événements spéciaux etc.). La littérature montre tout de même qu'il n'est pas facile d'évaluer les causes de la congestion, surtout qu'elles sont souvent combinées (OCDE, 2007). La FHWA a publié une estimation de la répartition des causes moyennes de la congestion aux États-Unis en 2004 (Figure 2-2), mais soutiennent que les conditions locales varient largement, d'une ville à l'autre, et entre les autoroutes et les routes avec signalisation (Cambridge Systematics, 2005). En plus de causer des retards importants, les causes incidentes de la congestion augmentent également la variabilité des conditions de circulation. Certains chercheurs s'intéressent donc davantage à la fiabilité des conditions de circulation d'un jour à l'autre, selon l'hypothèse que le public souhaite surtout « arriver à l'heure » et qu'un retard imprévisible est plus irritant qu'un retard récurrent (Cambridge Systematics, 2005).

³ Les autoroutes ont des carrefours à niveaux multiples (flot ininterrompu) et les routes avec signalisation ont des carrefours au même niveau (flot interrompu, contrôlé).

Figure ES.2 The Sources of Congestion
National Summary



Source: <http://www.ops.fhwa.dot.gov/aboutus/opstory.htm>.

Figure 2-2 : Sources de la congestion aux États-Unis (Source : FHWA 2005)

Il arrive aussi de rencontrer des congestions qui n'ont pas de raison apparente, ce que certains chercheurs appellent *phantom traffic jams* ou congestion fantôme. Sugiyama et al. (2008) ont démontré expérimentalement ces congestions qui apparaissent sans goulot en demandant à 22 automobilistes de suivre une vitesse constante de 30 km/h sur un circuit circulaire d'une circonférence de 230 m. Le résultat est montré à la Figure 2-3, soit la formation d'une congestion seulement 3 minutes après le début de l'expérience, simplement due à la variabilité des vitesses des véhicules, malgré l'ordre de conserver une vitesse fixe. Un groupe de chercheurs (Flynn et al. 2009) a aussi développé un modèle pour démontrer mathématiquement les résultats expérimentaux. Ces travaux montrent que la variabilité du comportement humain peut causer la congestion routière⁴. La voiture intelligente semble une solution à ce phénomène.

⁴ Certains diront que le comportement modifie la capacité et crée le goulot.

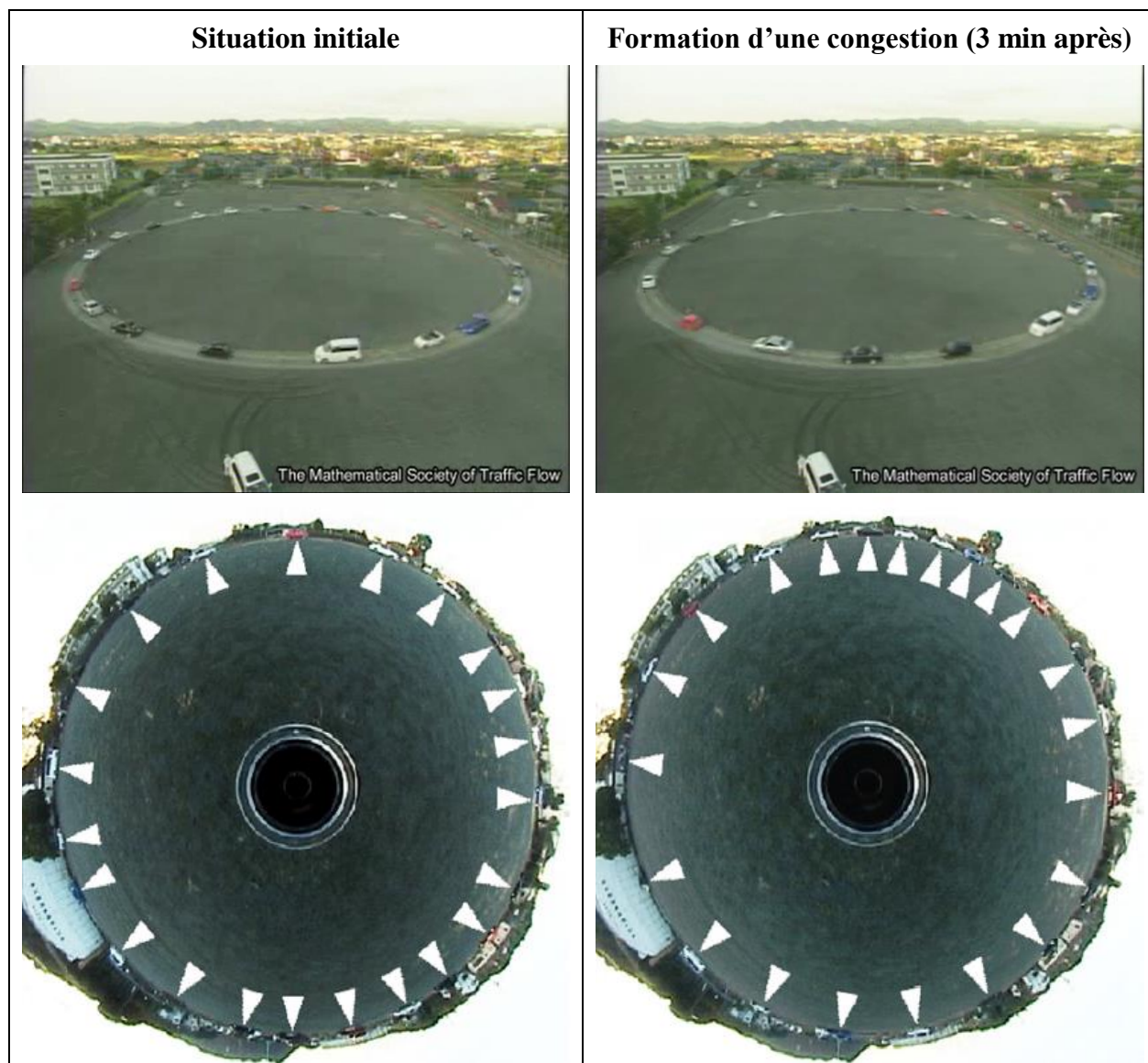


Figure 2-3 : Instantanées de la vidéo⁵ de l'expérience de Siguyama et al. (2008)

En résumé, les causes de la congestion sont bien connues, soit les causes récurrentes (fusion des voies, bretelle d'entrée, demande qui dépasse la capacité) et les causes incidentes (météo, accidents, travaux, signalisation, événements spéciaux), mais souvent difficiles à évaluer. Certains chercheurs traitent aussi des causes « fantômes » de la congestion qui sont essentiellement reliés au comportement humain. Bref, les causes sont un élément important de la définition de la congestion routière.

⁵ Vidéos disponibles au <http://iopscience.iop.org/1367-2630/10/3/033001/media>

2.1.4 Impacts de la congestion

Les impacts de la congestion routière sont énormes, autant aux niveaux économique, environnemental que social. Le rapport *Évaluation des coûts de la congestion routière dans la région de Montréal pour les conditions de référence de 2008* (Les conseillers ADEC, 2014) chiffre le coût socio-économique de la congestion pour 2008 à 1,85 G\$. Selon l'étude, ces coûts n'ont jamais cessés d'augmenter : 665M\$ en 1993, 953 M\$ en 1998 et 1,57 G\$ en 2003 (en \$ de 2008). Cette étude utilise les données de déplacements des enquêtes origine-destination respectives réalisées par l'AMT, les simulations de débits sur le réseau produites par le MOTREM du MTQ et les revenus d'emploi provenant du recensement canadien. Les coûts socio-économiques considèrent la valeur du temps de retard selon le statut d'emploi, le motif, et le salaire, le coût de l'utilisation des véhicules, le coût du carburant et le coût des émissions de polluants atmosphériques et des GES. De son côté, le rapport *Le coût de la congestion urbaine au Canada* (Transport Canada, 2006) présente des coûts liés à la congestion de l'ordre de 702M\$ à 987M\$ (\$2002) dans la zone urbaine de Montréal.

Aux États-Unis, l'Urban Mobility Report (UMR), produit par le Texas Transportation Institute, chiffre les coûts de la congestion à 121 milliards de dollars pour 2011, dont 27 milliards dus au retard des marchandises (Shrank et al, 2012). L'impact annuel du temps perdu en congestion est évalué à 818 USD par usager de véhicule particulier. L'UMR évalue aussi à 2,9 milliards de gallons le carburant « gaspillé » et à 56 milliards de livres (25,4 milliards de kg) le CO₂ produit durant la congestion pour tout le pays en 2011.

La congestion a aussi des impacts sur la santé des individus. Selon une étude récente de Barreck (2015), le seuil acceptable de trajet routier est évalué à 20 minutes. Au-delà de ce seuil, le risque d'épuisement professionnel augmente significativement, 35 minutes étant considéré comme un maximum, ce qui est près de la moyenne de 30 minutes pour le trajet domicile-travail des Montréalais (Turcotte, 2011).

2.1.5 Solutions à la congestion

Quelle est la solution à la congestion? C'est la première question posée par les citoyens affectés qui préconisent souvent l'ajout d'une nouvelle voie de circulation pour alléger le trafic. Par contre, l'augmentation de la capacité du réseau routier est maintenant connue comme une solution

temporaire, car elle engendre une nouvelle demande (ou demande induite) et génère une redistribution de la circulation (Downs, 2004). La solution réside alors dans le mécanisme inverse qui est de réduire la circulation. On peut regrouper les différentes stratégies de la littérature en quatre catégories principales : gérer la demande, améliorer les offres alternatives, réduire les besoins de mobilité et améliorer l'information aux usagers.

Selon Cambridge Systematics (2005), la clé est de se concentrer sur les stratégies qui améliorent le fonctionnement des infrastructures existantes, puisque leur cible est d'augmenter la fiabilité du réseau. En gérant rapidement les sources de congestion incidentes, on réduit la variabilité du temps de parcours ce qui augmente la fiabilité du système de transport. Voici quelques stratégies proposées :

- Incidents routiers : identifier, répondre et gérer plus rapidement
- Zones de travaux : réduire l'impact des travaux en pointe
- Conditions météorologiques : prévision pour un traitement de surface plus efficace
- Planification des événements spéciaux : coordination et plans de contrôle de la circulation
- Feux de signalisation : système adaptatif à la demande en temps réel le long de corridors
- Information en temps réel aux usagers de la route à propos de la circulation
- Introduction de péage et d'une tarification de la congestion dynamique

Premier constat tiré de la littérature : les approches varient beaucoup d'un pays à l'autre. Toutefois, les solutions appliquées en Amérique du Nord devraient se rapprocher le mieux de celles à envisager au Québec, les enjeux de mobilité étant semblables. Second constat, les réponses des usagers aux stratégies qui visent à changer leurs comportements de transport sont complexes, voire parfois opposées aux réactions attendues. Par exemple, il y a eu des effets pervers à l'application de la stratégie de circulation alternée (plaque d'immatriculation paire ou impaire selon le jour) dans certaines villes où les résidents ont simplement trouvé le moyen d'avoir deux plaques ou deux véhicules pour circuler. Enfin, une réduction de la congestion est souvent vue comme une augmentation de la mobilité, mais le suivi des impacts des stratégies est souvent très limité. En résumé, il est suggéré de se concentrer sur les causes de la congestion incidente sur l'infrastructure existante en plus de gérer la demande en changeant le comportement des usagers et de s'assurer de bien faire le suivi des stratégies en mesurant les impacts sur la circulation.

2.1.6 « Bénéfices » de la congestion

Toutes les solutions pour réduire la congestion routière sont intéressantes, mais l'objectif ne sera jamais de réduire la congestion à zéro. C'est tout simplement impossible. En fait, le meilleur moyen de supprimer la congestion serait de supprimer les voitures ou les emplois. Est-ce souhaitable?

Downs (2004) consacre un chapitre de son ouvrage aux « bénéfices de la congestion ». Selon l'auteur, le vrai problème est la demande excessive aux heures de pointe. À ce problème, il propose quatre solutions : implanter une tarification routière (difficultés d'acceptabilité sociale), développer le réseau routier (très coûteux et peu durable), offrir suffisamment de transport collectif de masse (très coûteux et ne convient pas nécessairement à tous) et laisser les usagers former des files d'attente, donc la congestion. Sa théorie amène à comprendre que la congestion est la meilleure « solution » à la demande excessive. Le rapport de l'OCDE (2007) ajoute que la congestion routière en milieu urbain est souvent le symptôme d'un développement économique réussi d'une ville, où les emplois et les logements font en sorte que les gens souhaitent s'y rendre pour y travailler et y habiter, augmentant la demande sur les réseaux de transport.

Bref, la congestion routière est une conséquence, indésirable pour certains impacts négatifs, de la demande excessive qui est due à une croissance économique urbaine.

2.1.7 Mesure de la congestion

Les données de mesure de la congestion se résument à des données de vitesse, de temps de parcours, de débit et de longueur de file d'attente. Les technologies de suivi de la circulation en continu sont bien connues et largement étudiées dans la littérature (Saunier et Morency, 2011) : les boucles de détection, la vidéo-détection, la reconnaissance de plaque d'immatriculation, les détecteurs Bluetooth, les véhicules équipés de dispositifs GPS et les données de téléphones mobiles. Ces dernières années, l'utilisation des données de fournisseurs tels que INRIX, TomTom, HERE et Google est devenue la norme aux États-Unis auprès des chercheurs et des agences de transport. Les Urban Mobility Report 2010, 2011 et 2012 ont complètement revu leurs méthodologies d'estimation des indicateurs avec les données d'INRIX. Ces données ont l'avantage d'être fournies toutes les 15 minutes (Shrank et al, 2012), mais ont aussi certains inconvénients.

Les fournisseurs de données utilisent le Traffic Message Channel (TMC) qui est un format de diffusion des informations sur la circulation et la météo en temps réel développé et géré par la

Traveller Information Services Association (TISA)⁶. En d'autres mots, le TMC est un découpage du réseau routier organisé pour échanger de l'information entre des dispositifs embarqués et des stations d'information. Un segment TMC est souvent similaire à un segment de route entre deux carrefours de route, ce qui fait en sorte que sa longueur est variable sur le réseau, allant de 500 m à plusieurs kilomètres de long (INRIX, 2010). Cette situation fait en sorte qu'il n'y a pas de résolution plus fine entre deux échangeurs d'autoroute, pour le moment. Un réseau de « sub-TMC » devrait voir le jour bientôt. Une autre particularité de ces données fournies toutes les 15 minutes est que leur origine est inconnue pour leurs utilisateurs, précaution faite pour rendre les données anonymes. Ainsi, l'avantage pour l'analyste est que la préparation des données est faite en amont, mais l'inconvénient est qu'il n'est pas possible de retrouver les facteurs explicatifs liés à des particularité de ces données, par exemple si elles proviennent d'une flotte de camion de livraison ou d'une combinaison de données observées et prédites. Ces données doivent donc validées par l'analyste avant d'être utilisées.

En résumé, les données de mesure de la congestion utilisées dans la littérature récente (Lasley et al. 2014; Remias et al. 2014; Wolniak et al. 2014) se résument en deux éléments : les données de vitesse en temps réel et historique fournies par INRIX sur le réseau TMC et les données de débit, normalement mesurée par le gestionnaire du réseau selon ses détecteurs disponibles.

2.1.8 Synthèse

L'objectif de cette première section de la revue de littérature était de mieux comprendre la congestion pour en dégager une définition et les variables pertinentes. La congestion est définie selon quatre paramètres (demande sur capacité, retard ou temps de parcours, vitesse et coût) qui sont comparées à des valeurs de référence. La définition inclue aussi une notion de congestion acceptable qui varie dans le temps et l'espace et selon la perception des usagers de la route. La congestion est également caractérisée par ses causes qui sont catégorisées par récurrentes (goulot permanent) et non-récurrentes (goulot incident), ce qui introduit la notion de fiabilité du temps de parcours. En effet, la congestion fait peut-être partie d'un équilibre nécessaire dans un milieu urbain, mais ce qui est le plus irritant pour les usagers est l'imprévisibilité des conditions de

⁶ <http://tisa.org/technologies/tmc/>

circulation. C'est d'ailleurs au niveau de la congestion incidente que les stratégies seraient les plus efficaces.

À la lumière des sous-sections précédentes, une définition qui tiendrait compte de tous les paramètres de la congestion pourrait être : la congestion routière est un phénomène physique et relatif qui survient lorsque les paramètres de la circulation (débit, vitesse et dérivés) deviennent moins désirables que les valeurs de référence fixées et qui varie selon le temps, l'espace, le seuil d'acceptabilité et la cause (récurrente et incidente). Maintenant, pour mieux comprendre la congestion, il faut l'évaluer à l'aide d'indicateurs, sujet de la prochaine section.

2.2 Indicateurs de la congestion routière

Cette section dresse la liste des indicateurs de la littérature afin d'identifier les indicateurs pertinents pour l'analyse et le suivi de la congestion à Montréal. Plusieurs dizaines d'indicateurs de la congestion routière ont été recensés dans la littérature. Le mémoire de Ladier (2006) fait l'inventaire des indicateurs de la circulation routière selon trois usages : informer (information en temps réel), gérer (gestion temps réel, suivi quotidien des actions de gestion) et décider (comparaison avant après, avec ou sans, suivi à long terme). L'OCDE (2007) a recensé les indicateurs utilisés parmi ses pays membres et les a catégorisés selon six grandes catégories d'indicateurs :

- Indicateurs basés sur la vitesse
- Indicateurs de capacité, de niveau de service
- Indicateurs temporels, basés sur le retard
- Indicateurs spatiaux
- Indicateurs de fiabilité
- Indicateurs économiques coût/efficacité

Ces catégories sont reprises pour lister les indicateurs pertinents dans cette section qui débute par introduire la notion d'indicateur et un court historique de l'utilisation des indicateurs.

2.2.1 Notion d'indicateur

Comme l'a énoncé Peter Drucker, « *if you can't measure it, you can't manage it.* » (on ne peut pas gérer quelque chose qu'on ne peut pas mesurer). Les indicateurs de la congestion routière sont donc

très importants dans la gestion d'un réseau de transport. Commençons par définir le terme *indicateur*. Une définition répandue est celle proposée par l'OCDE (2007) : « Un indicateur est un paramètre ou une valeur dérivée de paramètres donnant une information sur un phénomène ». Ici, le phénomène étudié est la congestion et ses paramètres sont le débit, le temps de parcours, la vitesse et le coût. Les indicateurs sont donc dérivés de ces paramètres.

Litman (2015) propose la définition suivante : « Les indicateurs sont quelque chose qu'on mesure pour évaluer le progrès envers des objectifs cibles [traduction libre] ». On choisit donc un indicateur en fonction de ce qu'on veut analyser ou faire le suivi. Par contre, Hallenbeck et al. (2014) soulèvent les enjeux reliés aux indicateurs de performance du réseau routier dans le cadre de MAP-21 aux États-Unis. Si l'objectif des indicateurs est d'obtenir un financement pour le système de transport des régions, les régions n'ont aucun avantage à montrer des indicateurs de bonne performance. De plus, si les indicateurs utilisent seulement des mesures du réseau routier, ils vont seulement favoriser des solutions liées au réseau routier. Les auteurs suggèrent donc d'utiliser le changement modal et la variation de la population et du taux d'emploi en plus des indicateurs routiers afin d'évaluer la mobilité durable et la réduction de la congestion. Litman (2014) abonde dans ce sens et propose d'utiliser les coûts de la congestion, en incluant les externalités et le multi-modal, au lieu de seulement l'intensité de la congestion, dans un objectif de mobilité durable.

En résumé, un indicateur permet d'évaluer un phénomène en utilisant ses paramètres mesurables. Par contre, le choix d'un indicateur par rapport à un autre pour étudier un phénomène laisse place à une certaine subjectivité ou une distorsion de l'évaluation faite du phénomène. Il est donc primordial de définir l'objectif de l'indicateur avant de choisir l'indicateur comme tel.

2.2.2 Historique de l'utilisation des indicateurs

De nombreux indicateurs ont été proposés pour mesurer la congestion au fil des ans. Avant de plonger dans ses indicateurs, voici un court historique de leur utilisation aux États-Unis, pays auquel le Canada fait référence en matière d'analyse de la congestion étant donné les similarités.

Le *Highway Capacity Manual* (HCM) est apparu en 1950 en tant que premier guide pratique pour la conception des autoroutes selon une capacité calculée. Le HCM a introduit le concept de niveau de service ou *Level of service* (LOS) à sa deuxième édition en 1965, qui est devenu la référence

pour mesurer la congestion selon différentes conditions. À l'époque, l'expansion rapide du réseau routier était l'option préconisée pour améliorer le niveau de service.

Les travaux de Tim Lomax du Texas Transportation Institute (TTI) sont une référence aux États-Unis avec de multiples recherches sur la congestion routière et la publication annuelle d'un *Urban Mobility Report* (UMR) depuis 1982 (Lomax et al. 1982). Le rapport *Quantifying Congestion* (Lomax et al. 1997) dans le cadre du National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), écrit par le TTI, a constitué une étape importante dans le domaine. Il est le premier document qui fournit des méthodes pour mesurer la congestion avec des paramètres simples pouvant s'appliquer à une route, un corridor ou une région métropolitaine. Il propose aussi une liste d'indicateurs de la congestion.

Le développement d'indicateurs a explosé avec les nouvelles technologies de mesure de la circulation et plusieurs rapports font état des avancées de la recherche et des nouveaux indicateurs. Le rapport NCHRP de Shaw (2003) analyse les forces et faiblesses de plus de 70 indicateurs de performance. Le rapport *Traffic Congestion and Reliability* (Cambridge Systematics, 2005) constitue un pilier dans la matière en mettant l'accent sur la variabilité de la congestion et les stratégies pour la réduire. Ensuite, les rapports *Measuring Transportation Network Performance* (Cambridge Systematics et al. 2010) et *Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability* (SHRP2, 2014) sont des guides complets qui décrivent les étapes de développement d'un système de suivi des conditions de circulation aux États-Unis. Les chapitres 36 et 37 du HCM 2010 (TRB, 2010) ont été ajoutés en 2014 et présentent des méthodes pour calculer la fiabilité du temps de parcours selon plusieurs paramètres.

Avec l'arrivée de certains fournisseurs de données en temps réel, tels que HERE, TomTom et INRIX, la mesure de la congestion est devenue accessible à tous, puisque la FHWA a acquis une base de données nationale qu'elle rend disponible à tous les états⁷. Ainsi, plusieurs outils d'analyse de la congestion, tel que Vehicle Probe Project Suite du RITIS (Pack, 2012), et de rapports annuels de la mobilité, tel que le Indiana Mobility Report (Remias et al. 2012), sont apparus avec la disponibilité de ces données.

⁷ http://www.ops.fhwa.dot.gov/perf_measurement/

2.2.3 Indicateurs de vitesse

La vitesse des véhicules est une mesure de base de la circulation. Les indicateurs de vitesse utilisent la moyenne des vitesses mesurées par rapport à une vitesse de référence. Litman (2014) suggère quatre différentes vitesses de référence :

- Vitesse à écoulement libre : mesurée en période hors pointe (LOS A)
- Limite de vitesse : vitesse légale maximum (LOS A-B)
- Vitesse maximisant la circulation : qui atteint la capacité (LOS C-D)
- Vitesse économique optimale : selon la volonté de payer de l'utilisateur (LOS C-D)

Le Tableau 2-2 montre trois indicateurs basés sur la vitesse sélectionnée dans la littérature, soit la vitesse moyenne, la différence de vitesse et le pourcentage de la vitesse de référence. Une seule référence est fournie par indicateur dans les tableaux de cette section, mais les indicateurs sont généralement présents dans plusieurs références.

Tableau 2-2 : Sélection d'indicateurs basés sur la vitesse dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Vitesse moyenne	Vitesse mesurée moyenne (horaire ou en pointe)	(a)
2	Différence de vitesse (<i>Speed Deficit</i>)	max (0 km/h, Vitesse référence – Vitesse moy. mesurée)	(b)
3	% de la vitesse de référence	$\frac{\text{Vitesse moy. mesurée}}{\text{Vitesse de référence}} \times 100\%$	(c)
Références : (a) OCDE, 2007 (b) Remias et al. 2012 (c) Lund et Pack, 2010			

La Figure 2-4 montre une grille spatiotemporelle qui affiche le pourcentage de la vitesse de référence selon la direction pour une journée donnée. Chaque couleur correspond à une classe de l'indicateur allant du rouge (congestion) au vert (vitesse de référence). Cet objet de visualisation permet de remarquer rapidement les variations de la congestion dans le temps et l'espace. On identifie facilement les heures de pointe et les endroits affectés par les événements routiers sont ajoutés et marqués par des icônes de panneaux sur la grille.

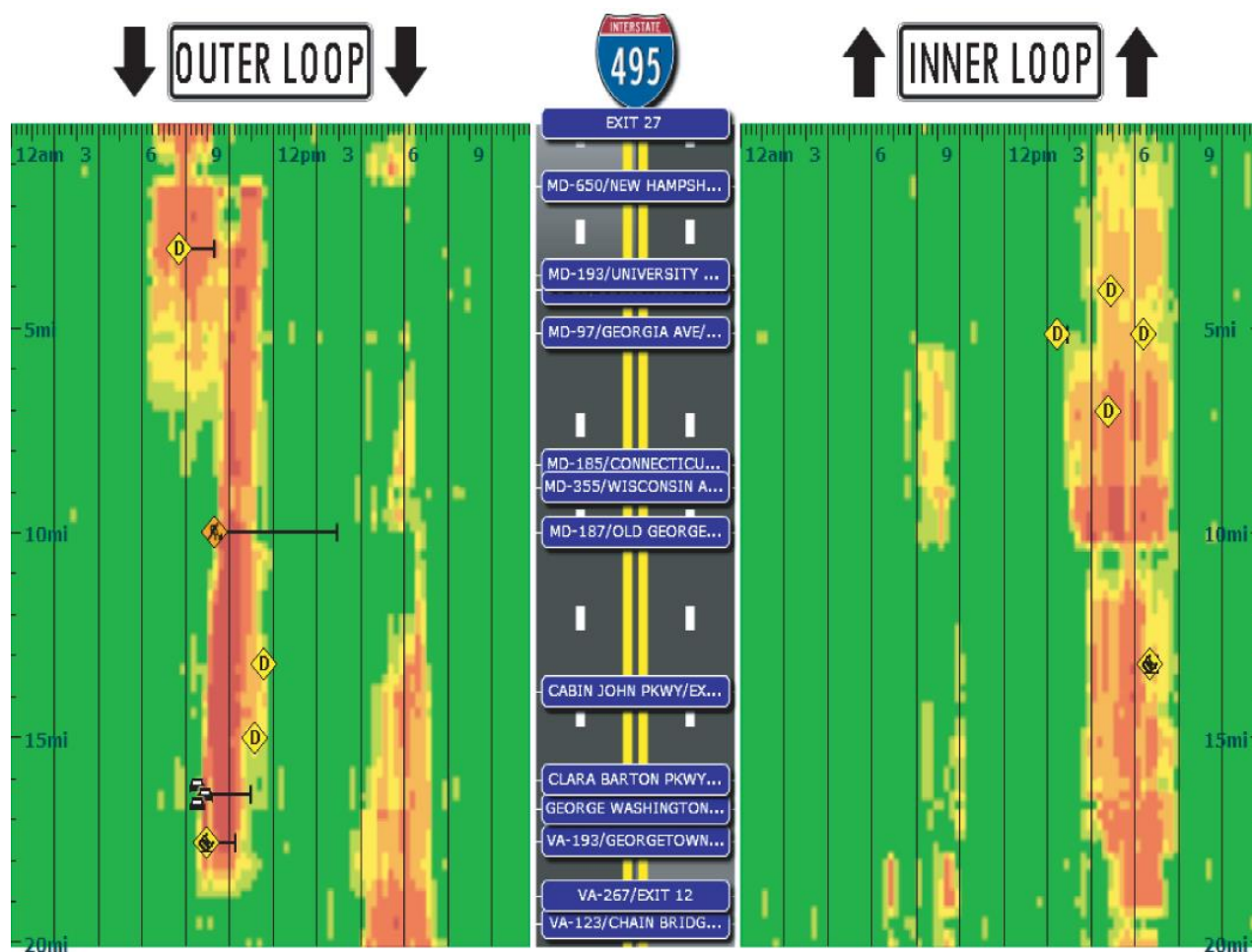


Figure 2-4 : Grille de congestion du % de la vitesse mesurée sur la vitesse de référence pour les deux directions de l'I-495 aux États-Unis (Source : Lund et Pack, 2010)

2.2.4 Indicateurs de débit et de capacité

La capacité est le nombre maximal de véhicules qui peuvent traverser un segment routier pendant un temps de référence, généralement l'heure, et varie selon de nombreux paramètres dont la géométrie, la composition de la circulation et les conditions environnementales. La mesure du débit de véhicules par heure permet d'évaluer l'utilisation de la capacité du segment. Certains indicateurs qui utilisent la mesure du débit sont présentés au Tableau 2-3.

Tableau 2-3 : Sélection d'indicateurs basés sur le débit et la capacité dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Niveau de service (<i>Level of service</i> LOS)	Densité de la circulation classée de A (libre) à F (congestion extrême)	(a)
2	Taux de saturation	$\frac{\text{Débit mesuré}}{\text{Capacité théorique (2000 véh/voie/h)}}$	(b)
3	Débit affecté par la congestion	% du débit journalier moyen au-dessus le seuil de la congestion	(b)
Références : (a) TRB, 2010 (b) OCDE, 2007			

Le HCM a introduit la notion de niveau de service (*Level of service* ou LOS) en 1965 qui est devenu une référence en matière de mesure de la congestion qui est généralement associée au LOS = E. Le Tableau 2-4 donne la description des LOS avec un ratio débit/capacité typique.

Tableau 2-4 : Description des niveaux de service du Highway Capacity Manual (TRB, 2010)

LOS	Description	Densité (uvp/km/voie)	Q/C typique
A	écoulement libre (circulation au moins à vitesse permise)	0 à 7	0 à 0,6
B	écoulement raisonnablement libre (légèrement moins fluide qu'en A)	7 à 11	0,6 à 0,7
C	circulation stable (les changements de voie sont plus difficiles)	11 à 16	0,7 à 0,8
D	transition vers une circulation instable	16 à 22	0,8 à 0,9
E	circulation instable, à capacité (la congestion est inévitable)	22 à 28	0,9 à 1
F	circulation forcée, congestionnée	> 28	> 1

L'utilisation du débit permet aussi de calculer des indicateurs qui tiennent compte de l'impact total de la congestion, du poids de la congestion. Par exemple, l'impact d'un retard de 50 minutes qui affectent 10 véhicules est moins important qu'un retard de 5 minutes pour 1000 véhicules. En multipliant le retard et le débit affecté par la congestion, on obtient le retard total.

2.2.5 Indicateurs de temps et de retard

La littérature regorge d'indicateurs reliés au temps. Par contre, plusieurs indicateurs de la littérature ont des définitions similaires, voire carrément identiques. Il n'est pas rare de retrouver exactement la même définition avec un nom différent. Par exemple, le TomTom Index⁸ a exactement la même définition que le Travel Time Index, sauf qu'il est représenté en pourcentage additionnel. Un avantage des indicateurs utilisant le temps de parcours est qu'ils peuvent être généralisés à tous les modes de transport (Lomax et al, 1997). D'un autre côté, si tout le monde utilisait la marche au lieu de la voiture, les temps de parcours augmenteraient, mais la mobilité serait plus durable. Le Tableau 2-5 dresse une liste des principaux indicateurs basés sur le temps de parcours ou le retard.

Tableau 2-5 : Sélection d'indicateurs de temps et de retard dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Temps de parcours	mesuré directement ou $\frac{\text{Longueur du segment}}{\text{Vitesse mesurée}}$	(a)
2	Travel Time Index (TTI)	$\frac{\text{TP mesuré}}{\text{TP à écoulement libre}}$	(a)
3	Retard	$\max(0, \text{TP mesurée} - \text{TP référence})$	(a)
4	Retard par distance unitaire	$\frac{\text{Retard}}{\text{Longueur du segment}}$	(a)
5	Taux de déplacement (<i>Travel rate</i>)	$\frac{\text{TP mesuré}}{\text{Longueur du segment}} = \frac{1}{\text{Vitesse moyenne}}$	(b)
6	Retard total (véhicule-heures en congestion)	$\sum (\text{Retard du segment} \times \text{débit mesuré})$	(b)
7	Retard causé par la congestion incidente	Retard associé aux incidents sur le réseau (accidents, météo, travaux et événements spéciaux)	(c)
8	Retard causé par la congestion récurrente	Retard qui n'est pas associé aux incidents, donc : Retard total – Retard incident	(c)
Références : (a) OCDE, 2007 (b) Shaw et al, 2003 (c) Kwon et al, 2006 TP : Temps de parcours			

⁸ https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/#/about

Essentiellement, ces indicateurs utilisent une différence ou un rapport du temps de parcours avec une valeur de référence, qui est souvent dérivée de la vitesse à écoulement libre. Le Chapitre 36 du HCM 2010 suggère aussi aux analystes d'utiliser une vitesse cible pour établir le temps de parcours de référence du Travel Time Index, un indicateur qu'ils ont baptisé le Policy Index (TRB, 2010).

Il existe aussi le Travel Rate Index (TRI) qui est similaire au Travel Time Index (TTI) à la différence que le premier utilise des vitesses simulées d'un modèle de demande en transport, alors que le second utilise des données de vitesse collectées en continu (Cambridge Systematics et al, 2008). Le TRI n'est plus vraiment utilisé avec les nombreuses sources de données en continu et n'est pas utile pour ce projet. L'avantage d'utiliser le TTI est que les données de vitesse en continu incluent la congestion incidente, alors que les modèles simulent seulement la congestion récurrente.

Le retard, parfois baptisé « temps additionnel », est l'indicateur dérivé du temps de parcours le plus utilisé. En le multipliant par le nombre de véhicules affectés par ce retard, on obtient le retard total, nécessaire pour calculer le coût de la congestion. Kwon (2006) a proposé une méthodologie pour diviser le retard total sur une autoroute en six composantes (causes) : les accidents, les événements spéciaux, les fermetures de voie, les conditions météorologiques, les rampes avec contrôle d'accès (*ramp meter*) et la demande excédant la capacité. Les composantes non-récurrentes sont d'abord estimées à l'aide d'une régression statistique, puis les embouteillages sont ensuite localisés pour estimer le potentiel de réduction du retard selon la capacité. La méthode a été appliquée à une section d'autoroute en Californie et les résultats diffèrent grandement selon la direction entre les périodes de pointe AM et PM (La Figure 2-5).

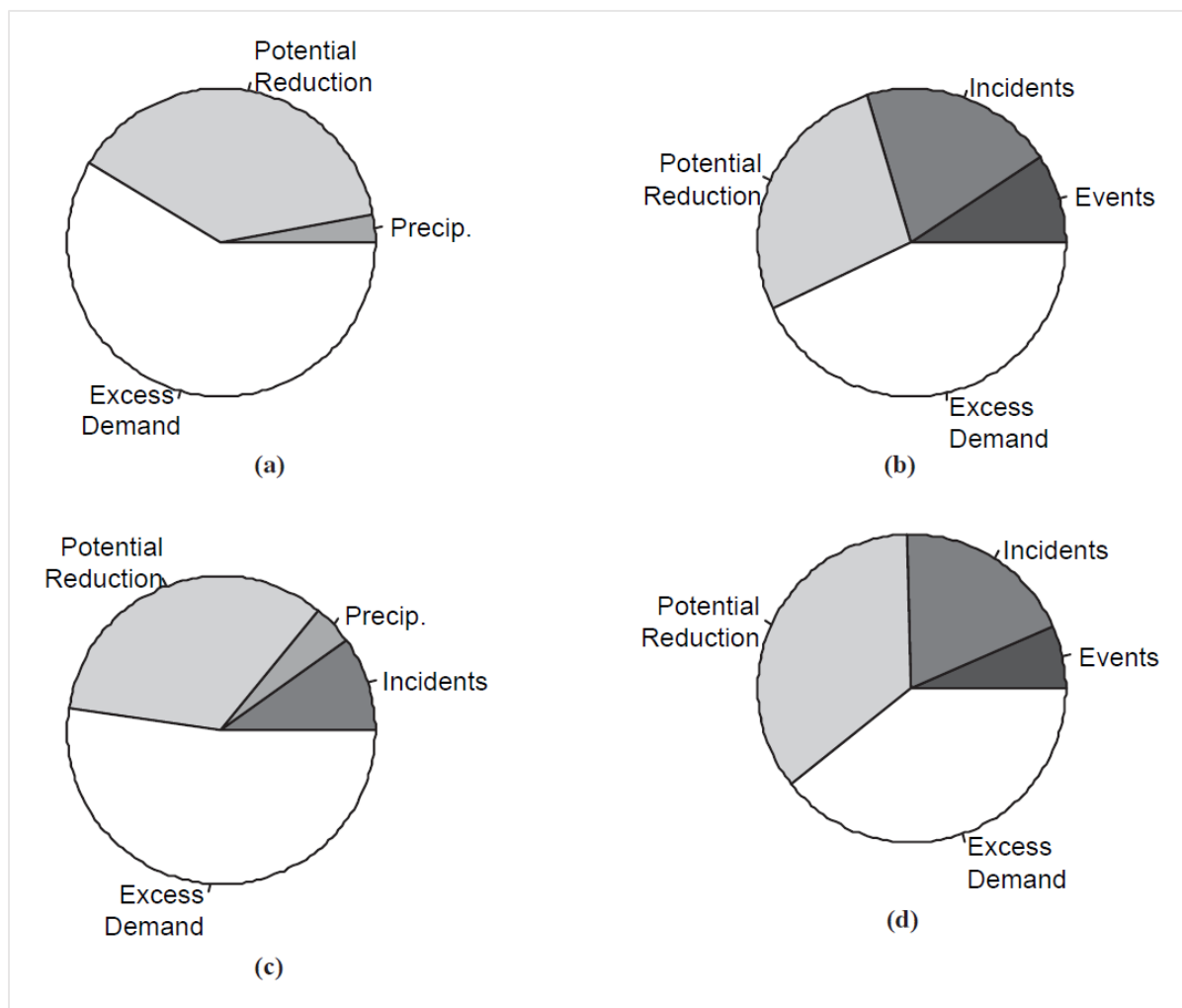


Figure 2-5 : Sources du retard et réduction potentielle sur l'I-880 Californie selon la direction et l'heure de pointe : (a) Nord AM, (b) Nord PM, (c) Sud AM, and (d) Sud PM (Source : Kwon et al, 2006)

2.2.6 Indicateurs spatiaux

Le réseau est un élément aussi important que les données de mesure de la congestion. L'étendue de la congestion varie dans le temps et l'espace. Les indicateurs du Tableau 2-6 s'intéressent à l'étendue spatiale.

Tableau 2-6 : Sélection d'indicateurs spatiaux dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Kilomètres de route (ou de voie) en congestion	$\sum (\text{Longueur segment (ou voie) en congestion})$	(a)
2	Véhicule-kilomètres en congestion	$\sum (\text{Longueur segment en congestion} \times \text{débit mesuré})$	(a)
3	Longueur d'une file d'attente	$\sum (\text{Longueur segment connexe en congestion})$	(b)
Références : (a) OCDE, 2007 (b) Pack, 2012			

Les indicateurs spatiaux sont souvent représentés sur une carte, tel que présenté à la Figure 2-6 a). Pack (2012) utilise le graphique en spirale (Figure 2-6 b) pour représenter les occurrences de la file d'attente sur la I-80 E. La durée de la file est dessinée sur le quadrant de la spirale et la longueur est indiquée par la classe de couleur. On comprend rapidement qu'une file d'attente se forme régulièrement entre 6h30 et 10h00 et qu'elle apparaît quelque fois en pointe PM, mais sur une courte distance et durée.

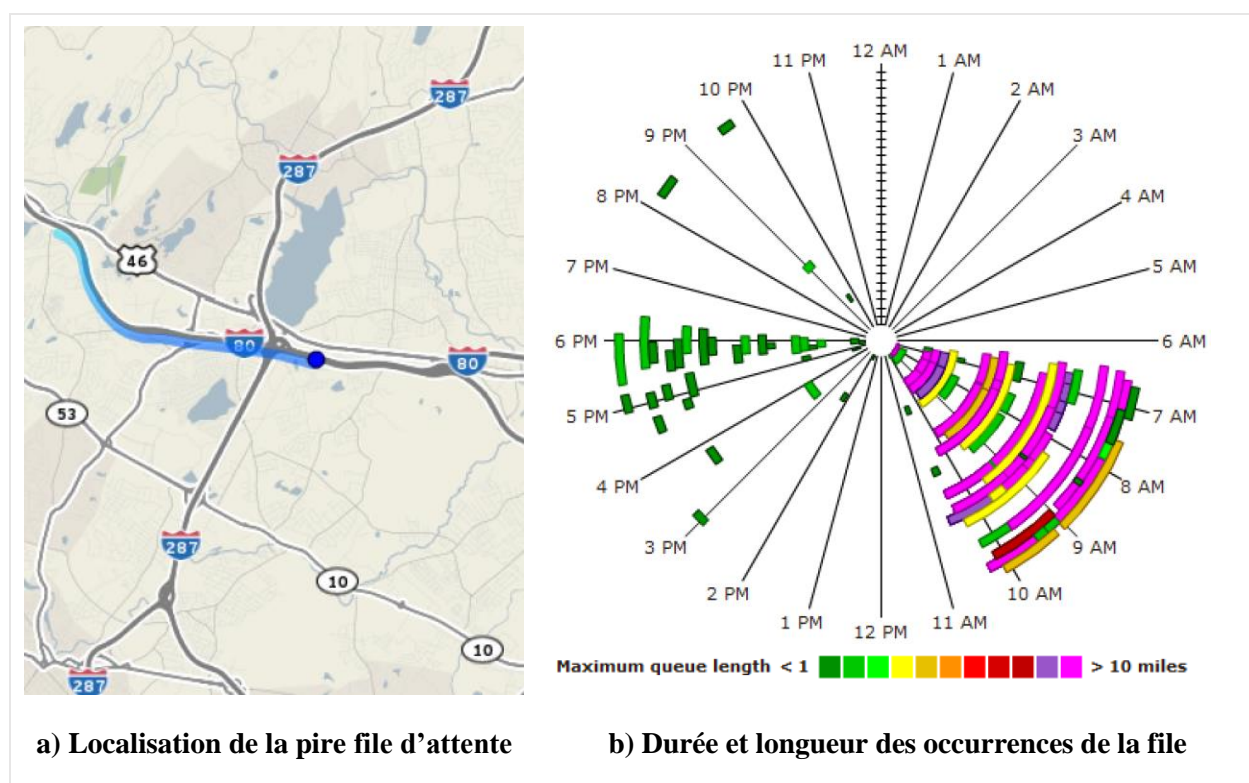


Figure 2-6 : Représentation de la durée et la longueur maximale (a) et sa distribution dans le temps (b) de la file d'attente sur le I-80 E à la sortie 43 pour mars 2012 (Source : Pack, 2012)

2.2.7 Indicateurs de fiabilité

La congestion n'est pas identique jour après jour. Une série d'événements incidents peuvent influencer le trafic et augmenter la variabilité du temps de parcours. Par conséquent, l'utilisateur doit planifier ses déplacements en se donnant une marge de manœuvre en espérant *arriver à l'heure*. La congestion demeure un phénomène imprévisible, mais les indicateurs de fiabilité tentent d'évaluer à quel point elle est imprévisible, ou plutôt à quel point il est nécessaire de partir d'avance pour *arriver à l'heure*. Le Tableau 2-7 montre quelques indicateurs de fiabilité du temps de parcours.

Tableau 2-7 : Sélection d'indicateurs basés sur la fiabilité dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Planning Time Index	$\frac{95^{\text{e}} \text{ centile du TP}}{\text{TP à écoulement libre}}$	(a)
2	Buffer Time Index	$\frac{95^{\text{e}} \text{ centile du TP} - \text{TP moyen}}{\text{TP moyen}}$	(a)
3	Misery Index	$\frac{\text{Moyenne des 5\% des TP les plus élevés}}{\text{TP à écoulement libre}}$	(a)
4	Indice de moyenne-variabilité (IMV)	$\frac{\text{moy}(\text{TP}) - \text{TP}_{\text{seuil}}}{\text{TP}_{\text{seuil}}} , \quad \frac{\text{CV}(\text{TP}) - \text{CV}(\text{TP}_{\text{seuil}})}{\text{CV}(\text{TP}_{\text{seuil}})}$	(b)
Références : (a) TRB, 2010 (b) Loustau et al, 2010 TP : Temps de parcours CV : Coefficient de variation = écart-type / moyenne			

Le Planning Time Index (PTI) et le Buffer Time Index (BTI) sont très répandus pour évaluer la fiabilité du temps de parcours. La Figure 2-7 illustre la distribution du temps de parcours et les définitions nécessaires pour calculer ces indicateurs. Tout d'abord, le Planning Time est le temps planifié nécessaire pour *arriver à l'heure* 19 fois sur 20, 95 % des fois, soit le 95^e centile de la distribution du temps de parcours. Le Buffer Time est le temps supplémentaire qu'on se donne pour *arriver à l'heure*, donc le Planning Time moins le temps de parcours moyen. Le HCM introduit aussi le Misery Time qui est le temps moyen des temps de parcours au-delà du Planning Time, donc du 5% plus élevé. Évidemment, d'autres centiles peuvent être utilisés, le 80^e centile représentant le temps planifié nécessaire pour *arriver à l'heure* 4 fois sur 5. C'est une question de tolérance au retard.

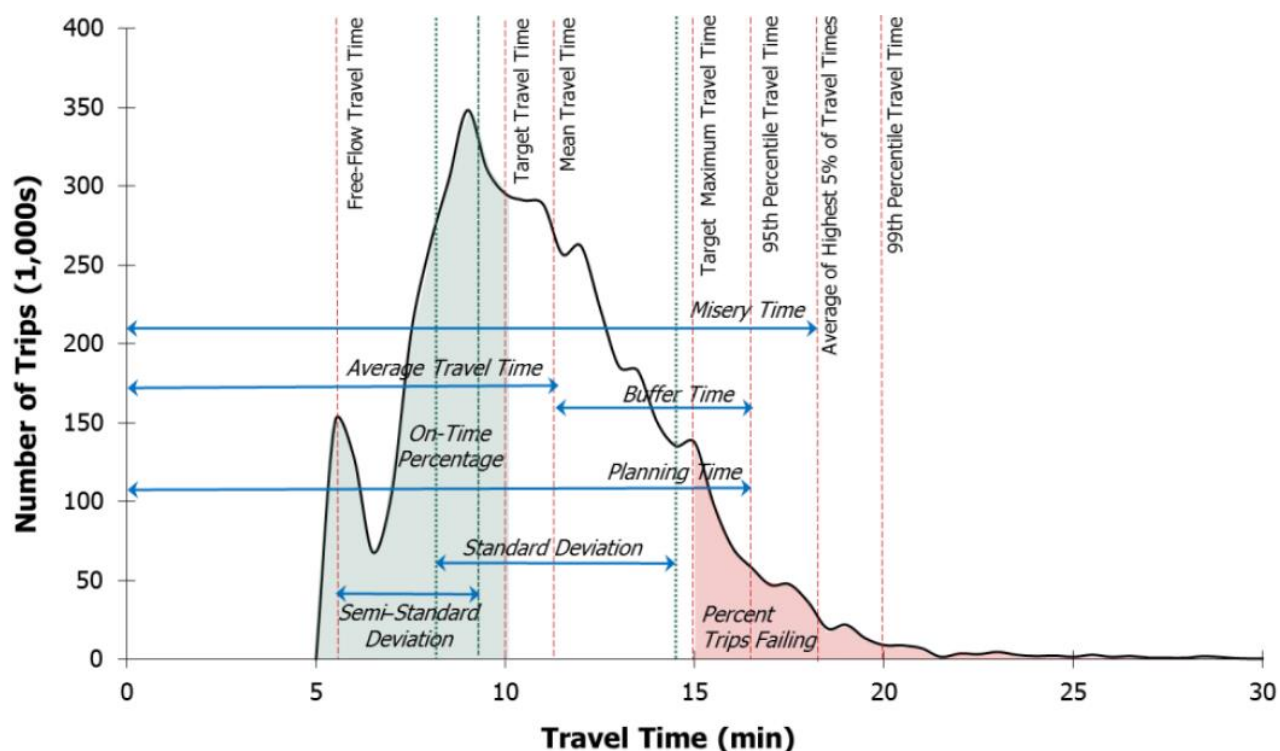


Figure 2-7 : Dérivation des indicateurs de fiabilité à partir de la distribution du temps de parcours (Source : TRB, 2010)

Loustau et al. (2010) ont proposé l'utilisation d'un indice de moyenne-variabilité (équation 4 du Tableau 2-7) pour comparer la fiabilité du temps de parcours sur plusieurs tronçons unitaires de 1 km d'une même autoroute. Sur la Figure 2-8, les points (tronçons) en-dessous de l'abscisse sont plus fiables. Pour calculer ces valeurs, le seuil du temps de parcours moyen a été fixé à 50 secondes (équivalent à une vitesse de 70 km/h) et le seuil du coefficient de variation à 0,5 (fluctuation de 50% du temps de parcours donc +/- 25 secondes).

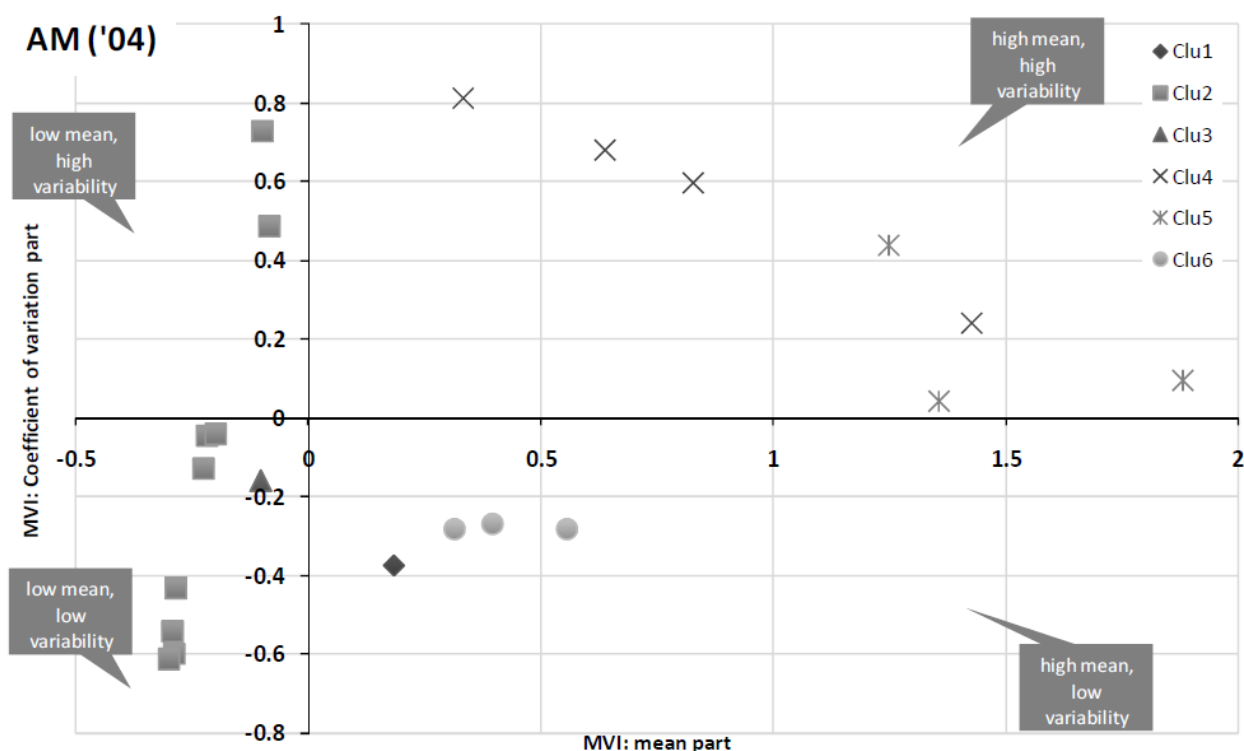


Figure 2-8 : Quatre quadrants de l'indice de moyenne-variabilité (IMV) du temps de parcours sur l'A13 en direction sud en pointe AM en 2004 (Source : Loustau et al, 2010)

2.2.8 Indicateurs de coûts

Le dollar est une unité de mesure qui parle beaucoup aux gestionnaires de réseau et au public. Monétiser les impacts de la congestion permet de la comparer à d'autres enjeux économiques. Il permet aussi de réaliser des analyses coûts-bénéfices. Lorsque l'on parle de transport, les coûts doivent aussi tenir compte des impacts sur l'environnement. Au Canada, le secteur des transports est le plus grand responsable des émissions de GES, représentant à lui seul 28 % des émissions totales⁹. Litman (2015) suggère aussi d'intégrer le plus possible d'externalités, telles que les coûts de santé liés aux accidents et à la pollution, dans le coût de la congestion. Le Tableau 2-8 présente quelques indicateurs de coûts de la congestion dans la littérature.

⁹ http://www.wwf.ca/fr/conservation/climatetenergie/transport_durable/

Tableau 2-8 : Sélection d'indicateurs basés sur les coûts dans la littérature

#	Indicateur	Description / Équation	Réf.
1	Coûts annuels de la congestion	$\sum (Q \times R \times (O \times \$ \text{ temps} + C \times É \times \$ \text{ CO}_2))$	(a)
2	Émission de CO ₂ additionnelle	Émission de CO ₂ produite en congestion – Émission de CO ₂ produite en condition fluide	(b)
3	Consommation de carburant additionnel	Carburant consommé en congestion – Carburant consommé en condition fluide	(b)
Références : (a) Remias et al, 2012 (b) Schrank et al, 2012 Q : Débit, R : Retard, O : Taux d'occupation du véhicule, \$ temps : valeur monétaire d'une unité de temps, C : Taux de consommation de carburant, É : Taux d'émission de CO ₂ , \$ CO ₂ : valeur monétaire d'une unité de CO ₂			

Le Indiana Mobility Report 2012 (Remias et al, 2012) calcule les coûts de la congestion en utilisant l'équation 1 du Tableau 2-8, soit en considérant la valeur monétaire du temps perdu en congestion et des émissions de CO₂ produites durant les heures congestionnées. La valeur du temps est une notion pratiquement philosophique, mais elle se base sur l'indice des prix à la consommation (IPC), tel que publié mensuellement par Statistique Canada. Les valeurs utilisées par le Indiana Mobility Report sont celles suggérées par l'UMR 2012 (Shrank et al, 2012), soit :

- 16,79 USD / personne-heure, pour le temps perdu en véhicule personnel
- 86,81 USD / véhicule-heure, pour le temps perdu et l'opération des véhicules commerciaux

La valeur monétaire du CO₂ était fixée à 22 \$ / tonne. La Figure 2-9 montre que les coûts totaux de la congestion ont énormément diminué entre 2011 et 2012 sur l'Interstate-94 en direction est. Cette diminution est expliquée par les importantes constructions sur ce corridor en 2011.

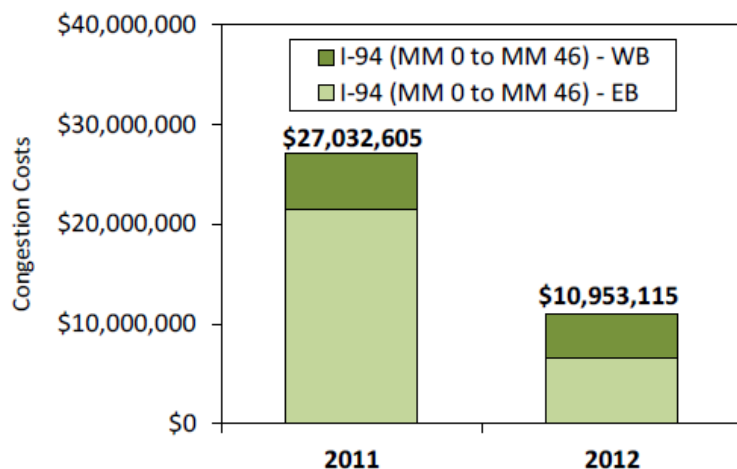


Figure 2-9 : Coûts totaux du retard (voitures et camions) et du CO₂ émis pour l'I-94 en Indiana selon l'année et la direction (Source : Remias et al, 2012)

2.2.9 Synthèse

L'objectif de cette seconde section de la revue de littérature était d'identifier les indicateurs pertinents pour l'analyse et le suivi de la congestion à Montréal. Tout d'abord, la notion d'indicateur et l'historique de l'utilisation des indicateurs est abordée. Une liste de 24 indicateurs pertinents est aussi présentée selon six catégories : vitesse, débit et capacité, temps et retard, spatiaux, fiabilité et coûts. On peut résumer tous ces indicateurs avec les mesures de la congestion et les opérateurs mathématiques suivants :

Mesures de la congestion

- Vitesse
- Temps de parcours
- Débit

Opérateurs mathématiques

- Moyenne
- Différence
- Somme
- Ratio
- Centile
- Classe
- Nombre, pourcentage
- Somme-produit
- Coefficient de variabilité

Le premier critère pour choisir un indicateur est la disponibilité des données de mesure nécessaires pour le calculer. Sioui (2014) a fait la revue des attributs souhaités pour un indicateur de la congestion et on peut les résumer en trois critères : être clair et simple pour les utilisateurs, permettre la comparaison entre différents objets et fournir des valeurs en continu. Tous les indicateurs présentés dans cette section répondent bien à ces critères et sont pertinents pour l'analyse et le suivi de la congestion à Montréal.

Par contre, dans le cadre de ce mémoire, seulement certains indicateurs seront évalués, puisque les comptages en continu ne sont pas disponibles et que l'intérêt est surtout au niveau méthodologique. Les indicateurs choisis sont présentés au Chapitre 3 et sont évalués au Chapitre 4.

2.3 Synthèse générale

Ce chapitre a proposé une revue de la littérature qui répond aux deux premiers objectifs qui sont de **mieux comprendre la congestion** pour en dégager une définition et les variables pertinentes et **identifier des indicateurs** adéquats pour l'évaluation de la congestion. La littérature montre qu'il existe plusieurs définitions plutôt partielles de la congestion. Une définition est proposée pour tenir compte de tous les paramètres reliés à la congestion routière :

La congestion routière est un phénomène physique et relatif qui survient lorsque les paramètres de la circulation (débit, vitesse et dérivés) deviennent moins désirables que les valeurs de référence fixées et qui varie selon le temps, l'espace, la cause (récurrente et incidente) et le seuil d'acceptabilité.

Une liste de 24 indicateurs pertinents est ensuite présentée selon six catégories : vitesse, débit et capacité, temps et retard, indicateurs spatiaux, fiabilité et coûts. Dans le cadre de ce mémoire, l'intérêt est surtout au niveau du développement d'une méthodologie d'estimation des indicateurs à partir de données de vitesse dérivées de traces GPS. De plus, et les données de débit ne sont pas disponibles en continu. Par conséquent, seulement les indicateurs les plus simples qui n'utilisent pas le débit sont choisis parmi les 24 du Chapitre 2 pour la méthodologie du Chapitre 3, puis évalués au Chapitre 4.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DE DÉVELOPPEMENT D'INDICATEURS

Ce chapitre répond au troisième objectif qui est développer une méthodologie d'estimation des indicateurs identifiés à partir de données de vitesse de traces GPS. Cette méthodologie est divisée en deux parties, soit l'organisation du système de données et le calcul des indicateurs. La Figure 3-1 illustre chaque étape de la méthodologie qui fait référence à une section de ce chapitre (3.X où X est le numéro de la sous-section) et les interrelations entre chaque étape et les deux prochains chapitres (4 et 5).

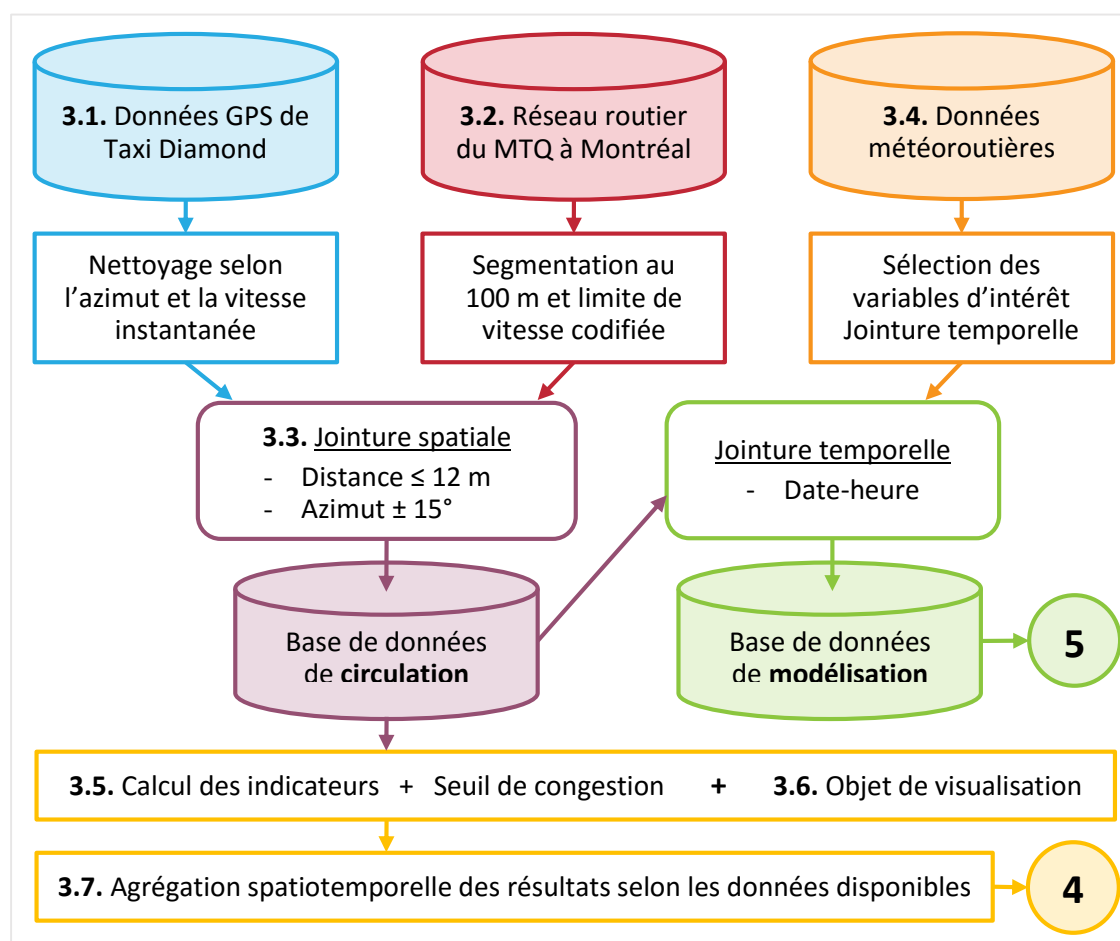


Figure 3-1 : Schéma de l'organisation du chapitre 3

Tout d'abord, les données de mesure de la circulation, les données de vitesse de traces GPS de la flotte de Taxi Diamond, sont nettoyées pour être appariées aux tronçons de 100 m du réseau routier sous la direction du ministère des Transports du Québec (MTQ), auxquels une limite de vitesse est codifiée. Ces deux bases de données sont fusionnées selon deux critères de jointure spatiale (distance et azimuth) pour former une base de données de circulation, utilisée pour le calcul d'indicateurs. En parallèle, des données d'une station météorologique sont traitées pour être jointes temporellement à la base de données de circulation, afin de former une base de données qui sera utilisée pour la modélisation au chapitre 5. Ensuite, le calcul des indicateurs nécessite le choix d'une équation d'indicateur, d'un seuil d'acceptabilité de la congestion et d'un objet de visualisation, dont la méthodologie de création est décrite. Le résultat est finalement agrégé selon la sélection spatiotemporelle et l'échelle d'agrégation choisies en tenant compte de l'échantillon de données disponible. Les résultats pour certains objets d'analyse sont présentés au chapitre 4.

3.1 Données de mesure : Données de vitesse d'une flotte de taxi

Les données de mesure constituent les éléments clé pour évaluer la congestion. Ce sont des caractéristiques des conditions de circulation (vitesse, temps de parcours, débit, densité, etc.) qui sont mesurées sur le réseau selon plusieurs méthodes de collecte de données. Il est à noter que l'option d'acheter les services d'un fournisseur de données de circulation agrégées tel que INRIX a été écartée d'entrée de jeu selon les recommandations faites lors du projet de recherche précédent pour le MTQ (Morency et al. 2011) et des besoins spécifiques énoncés par le MTQ dans le cadre de ce projet. Les données utilisées dans ce mémoire pour mesurer la congestion sont les données GPS associées à la vitesse instantanée (dérivée des mêmes données GPS) de la flotte de taxis de la compagnie Taxi Diamond. Malgré le fait que les chauffeurs de taxi puissent avoir des comportements de déplacement différents de la moyenne des automobilistes (itinéraires différents, attente de clients, etc.), il demeure néanmoins que lorsqu'ils circulent sur les autoroutes et les routes principales du réseau, les taxis suivent la circulation comme les autres véhicules. Ainsi, les taxis jouent le rôle de véhicules flottants dans la circulation, ou véhicule sonde (*probe*) et que la vitesse moyenne des taxis peut être considérée comme représentative de la vitesse moyenne de l'ensemble des véhicules pour les fins de ce projet. Cette section décrit l'ensemble de données fourni ainsi que les opérations de validation et de préparation des données.

3.1.1 Description des données GPS de Taxi Diamond

Taxi Diamond est une entreprise fondée en 1922; c'est un intermédiaire en services de transport par taxi à Montréal. Cette entreprise cumule à ce jour une flotte d'environ 1000 véhicules qui sont équipés d'un dispositif embarqué doté d'un GPS qui permet de suivre leur position sur le réseau. Elle a des licences pour opérer sur les agglomérations de taxi du centre de Montréal et de l'Ouest de Montréal, ce qui fait que les clients peuvent seulement utiliser leurs services à partir de ces deux territoires. Autrement dit, l'origine ou la destination de la course de taxi doit se situer dans la zone de permis du taxi. Ces zones sont définies par la Commission des transports du Québec (CTQ)¹⁰. Ainsi, les points GPS sont surtout concentrés au centre de l'île de Montréal et s'étendent principalement sur l'île, Laval et l'agglomération de Longueuil. La Figure 3-2 montre l'étendue spatiale des points GPS de la flotte de Taxi Diamond pour octobre 2014. On peut y voir que la majorité des autoroutes (en bleu) sont couvertes par au moins un point.

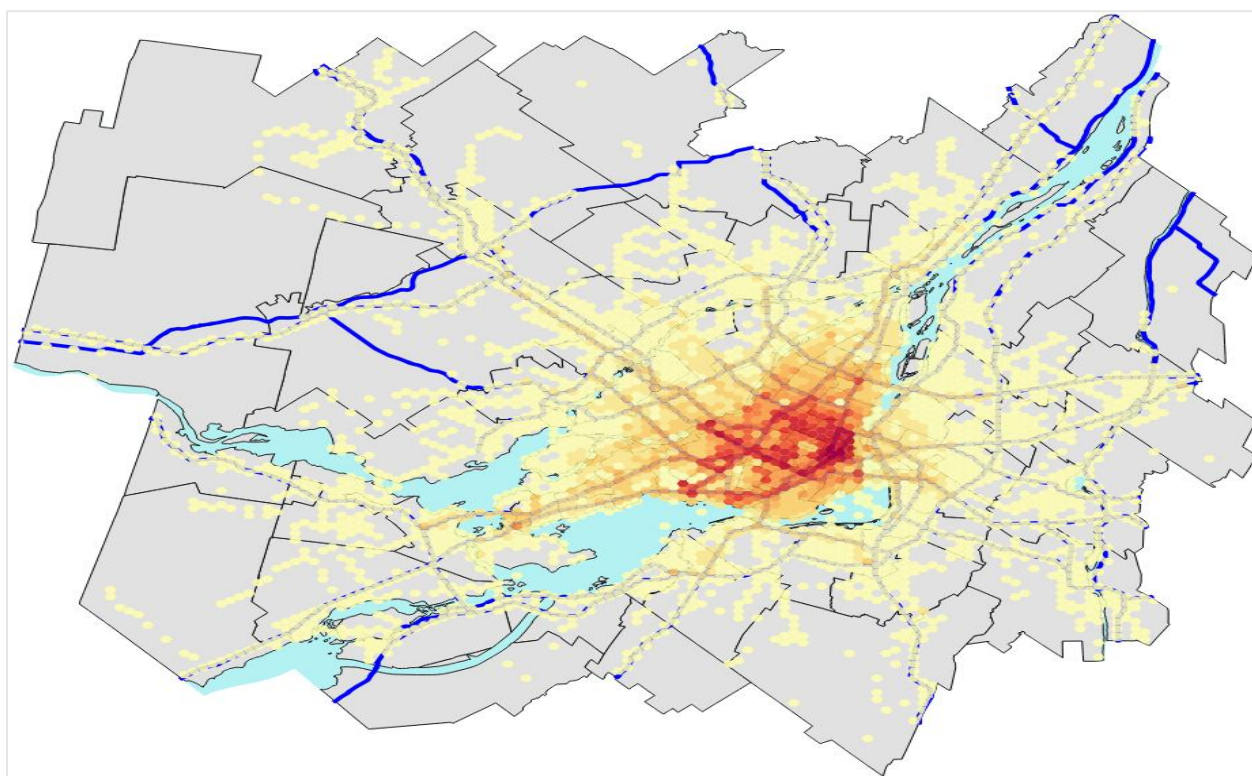


Figure 3-2 : Carte de la densité relative et de l'étendue spatiale des points GPS de Taxi Diamond pour le mois d'octobre 2014

¹⁰ Voir la carte : <http://www.ctq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/CarreInteractive/carte.html?id=tx&num=1>

En plus d'enregistrer une position GPS (latitude, longitude), le dispositif embarqué calcule aussi une vitesse instantanée (km/h) et un azimuth (orientation en degrés) à intervalles de temps réguliers; la date est aussi enregistrée sous forme d'horodatage (*timestamp*).

La fréquence d'enregistrement de ces mesures était au minimum toutes les 5 minutes ou tous les 600 m avant le printemps 2015. Elle est maintenant au minimum toutes les minutes ou tous les 500 m avec les nouveaux dispositifs¹¹. Une centaine de véhicules qui utilise une application mobile ont même une fréquence d'enregistrement toutes les 15 secondes ou tous les 100 m. Dans le cadre de ce mémoire, seulement des données reçues avant le printemps 2015 ont été utilisées, donc on peut supposer que la fréquence est toujours d'au plus 5 minutes ou 600 m.

Un fichier avec les données GPS de la veille est envoyé chaque jour par Taxi Diamond depuis le 2 février 2014. Cela constitue environ 300 000 points par jour et environ 9 millions de points par mois qui sont reçus dans nos serveurs depuis cette date et ces nombres de données par jour augmentent de mois en mois. Ces données quotidiennes s'ajoutent aux données historiques du 18 février 2011 au 1^{er} octobre 2013 reçues en bloc auparavant. Il est à noter qu'il y a des données manquantes entre octobre 2013 et février 2014. Aussi, plus de 70 jours sans données ont été identifiés depuis novembre 2014. La disponibilité des données a défini les plages de données utilisées pour les différentes études de cas durant le projet. De plus, un nettoyage des données a été effectué afin d'utiliser des données valides pour le calcul des indicateurs, tel que présenté dans la prochaine sous-section.

3.1.2 Nettoyage des données GPS

Une étape importante lorsque l'on utilise des mégadonnées (ou *big data*) est le nettoyage des données. L'objectif est de filtrer les données qui sont jugées non-valides. Deux critères de non-validité ont été utilisés : un azimuth problématique et des points avec une vitesse et un azimuth nul dans la base de données.

¹¹ Selon Jean-François Abel, responsable des bases de données chez Taxi Diamond, rencontré le 1^{er} septembre 2015.

3.1.2.1 Azimut problématique

L'azimut de chaque point est une valeur importante pour effectuer l'affectation des points au réseau. Par définition, l'azimut est l'angle formé dans le plan horizontal entre la direction d'un objet (dans le cas présent, un véhicule ou une route) et le nord géographique (0°), mesuré dans le sens horaire. La Figure 3-3 schématise cette définition avec deux exemples. L'azimut est calculé par le dispositif GPS embarqué dans les véhicules et il est arrondi au 1° ou 2° près. Par ailleurs, la vitesse instantanée est aussi calculée par le dispositif GPS embarqué et est arrondie à 1 km/h près.

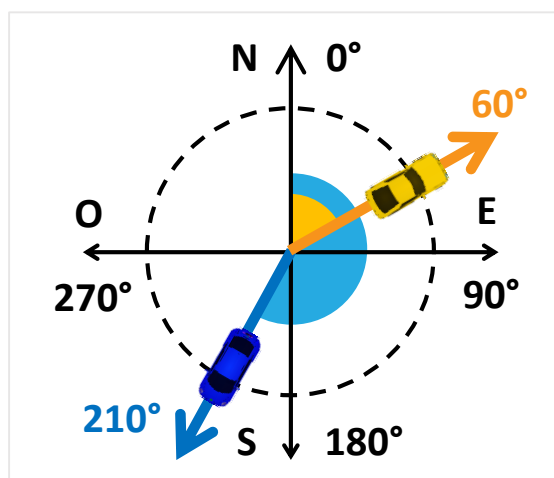


Figure 3-3 : Schéma de la définition de l'azimut

Une analyse des données a permis de réaliser que l'azimut était problématique pour les données GPS historiques. En effet, la valeur de l'azimut semblait bornée à 254° et la direction de ces azimuts ne concordaient jamais avec ceux du réseau pour les points enregistrés avant le 20 août 2012. Ensuite, les azimuts étaient bornés à 510° jusqu'au 28 mai 2013. Donc, ce n'est qu'à partir du 29 mai 2013 que l'azimut des données semble correct pour tous les véhicules, tel que montré à la Figure 3-4.

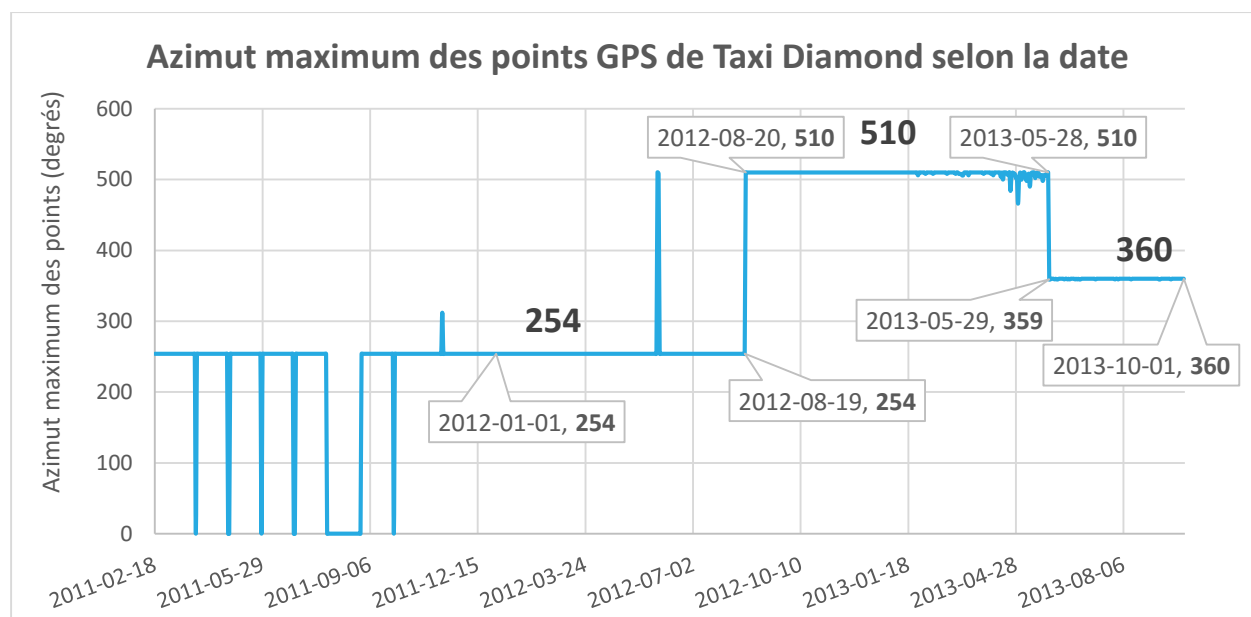


Figure 3-4 : Azimut maximum des points GPS historiques de Taxi Diamond selon la date

On peut supposer qu'il y avait une erreur dans la méthode de calcul de l'azimut par le dispositif GPS embarqué, qui a été complètement corrigée à la deuxième itération. Par contre, il est plus juste de dire que la situation a été corrigée graduellement entre le 20 août 2012 et le 28 mai 2013, comme en témoigne la Figure 3-5. Au départ, environ 5% des points (environ 15 000 sur 300 000 par jour) avaient un azimut au-delà de 360°, donc assurément incorrects, et ce pourcentage a diminué à moins de 1 % à la mi-novembre 2012. Par conséquent, certaines données de cette période semblent valides et pourront être considérées.

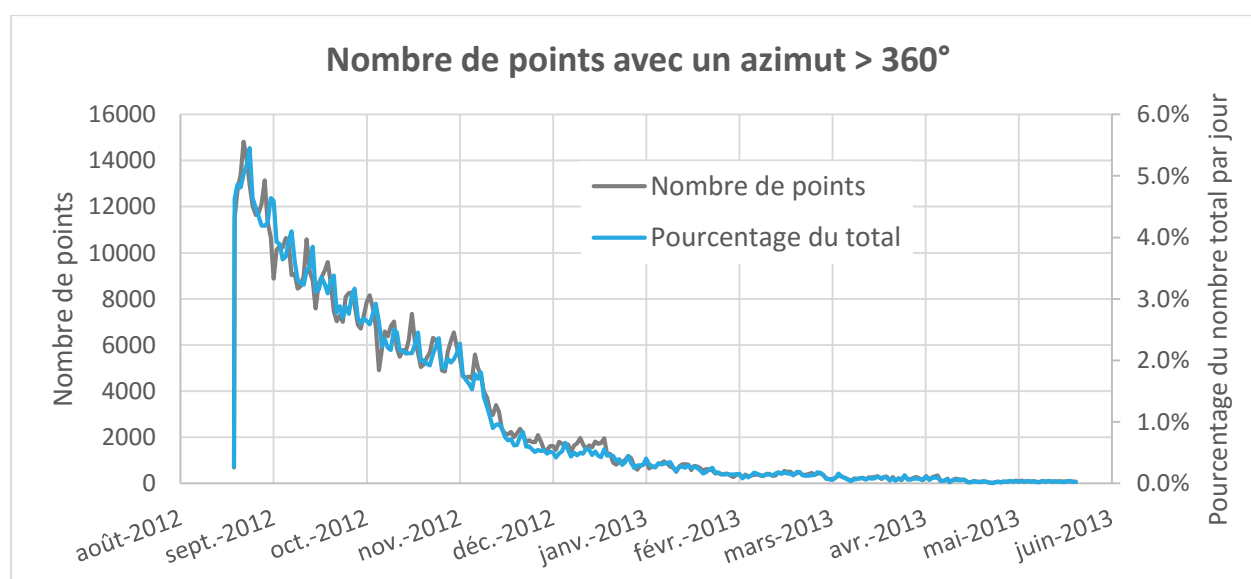


Figure 3-5 : Évolution du nombre de points avec un azimut plus grand que 360°

En conclusion, l'azimut des points n'est pas valide avant le 20 août 2012, est graduellement plus valide ensuite et tous les points sont considérés valides seulement à partir du 29 mai 2013.

3.1.2.2 Points à vitesse nulle et azimut nul

Lors de l'étape de nettoyage des données GPS, une attention particulière a été portée aux points avec un azimut nul (0°). Alors qu'un azimut nul représente normalement le nord, on retrouvait près de la moitié (49,2 %) des points avec un azimut de 0° pour le mois de juin 2013, soit 4,34 millions de points sur un total de 8,82 millions de points. Si un azimut de 0° est réaliste, il n'est pas aussi courant à Montréal qui a un axe typiquement décalé de 60° par rapport au nord géographique, tel qu'on peut le voir à la Figure 3-6. Cette figure montre le nombre de points par azimut pour le mois de juin 2013, en excluant l'azimut 0° , comparé à une section typique de la trame urbaine du centre-ville de Montréal.

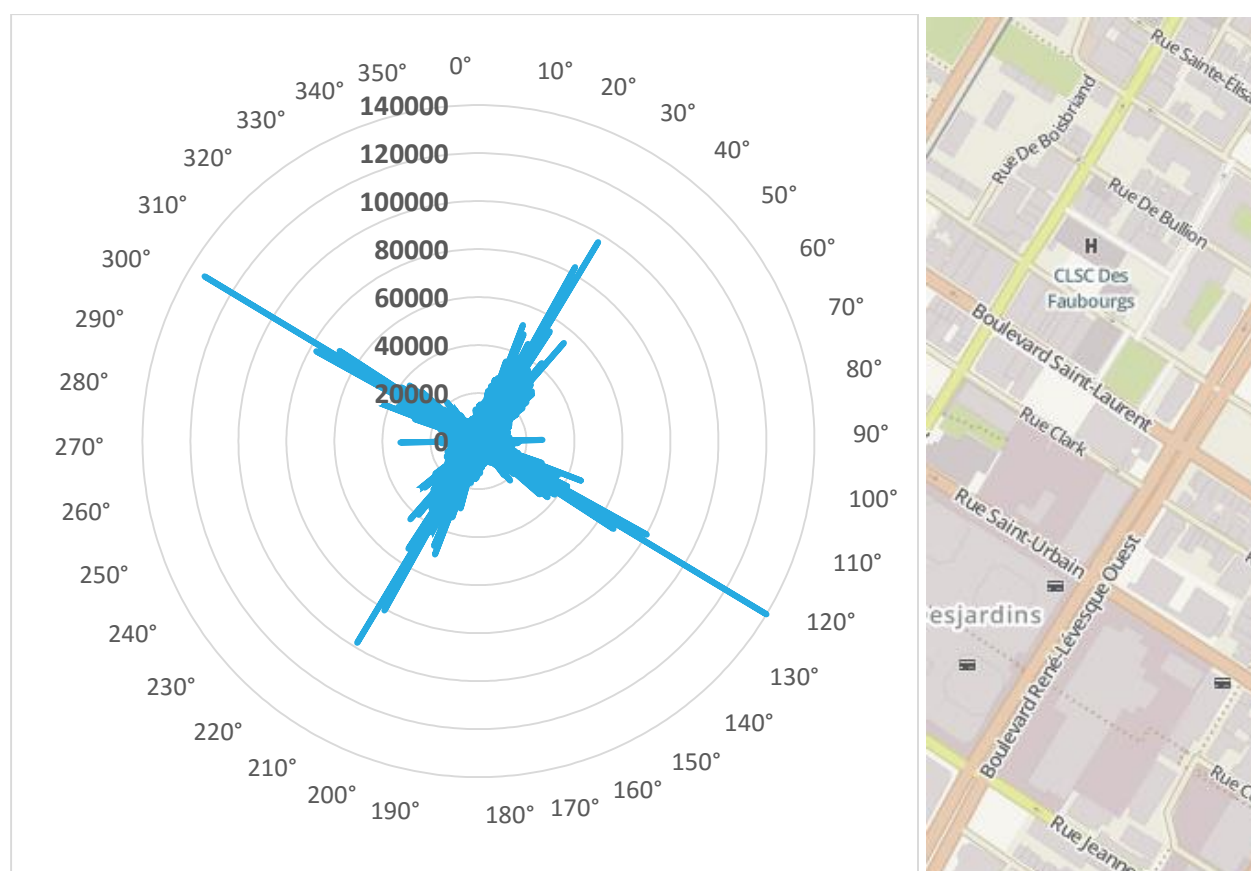


Figure 3-6 : Nombre de points selon l'azimut (sauf 0°) pour le mois de juin 2013

En examinant plus en détails, on observe que presque la totalité (98,8 %) des points ayant un azimut de 0° a aussi une vitesse de 0 km/h. On peut supposer que lorsque le dispositif GPS ne pouvait pas

calculer de valeur de vitesse ou d'azimut (la norme du vecteur vitesse est nulle), la valeur 0 était attribuée aux deux variables au lieu de laisser le champ vide (NULL). Par contre, il y a tout de même des points avec une vitesse nulle et un azimut non-nul. En conclusion, les points qui ont une vitesse nulle et un azimut nul ne seront pas considérés dans le calcul d'indicateurs dans le cadre de ce projet. On pourrait supposer que cela surestime la vitesse moyenne sur un tronçon, mais en réalité, puisqu'on utilise également l'azimut du tronçon routier pour associer la vitesse au tronçon, la vitesse moyenne serait grandement sous-estimée sur les tronçons routiers orientés plein nord si ce filtre n'était pas utilisé.

3.1.3 Synthèse

Le Tableau 3-1 décrit la table finale des données GPS de la flotte de Taxi Diamond telle qu'utilisée pour ce projet avec deux exemples pour chacun des champs.

Tableau 3-1 : Description de la table des données GPS de la flotte de Taxi Diamond

Colonne	Exemple 1	Exemple 2
Identifiant unique	XXXXXXXXXX	XXXXXXXXXX
Horodatage (<i>timestamp</i>)	2014-02-26 13:16:42	2015-09-07 08:16:24
Longitude de la position (°)	-73,598257	-73,77411
Latitude de la position (°)	45,54387	45,52122
Limite de vitesse (km/h)	55	121
Azimut (°)	122	324

3.2 Données de base : « Réseau du MTQ à Montréal »

Les couches d'information du réseau et de l'utilisation du sol forment les données de base. Ces données cartographiques constituent la référence géographique des données de circulation et des données explicatives. Ensuite, plusieurs attributs sont ajoutés au réseau pour permettre d'analyser la congestion. Cette section décrit la méthodologie utilisée pour identifier le « réseau du MTQ à Montréal », pour segmenter ce réseau en tronçons égaux de 100 m, pour calculer l'azimut des tronçons et pour codifier la vitesse et les régions sur ce réseau.

3.2.1 Définition du « Réseau du MTQ à Montréal »

L'expérimentation d'indicateurs de mesure vise à documenter le « réseau du MTQ à Montréal » ; c'est donc le premier élément de base à définir. Pour ce faire, il faut d'abord déterminer le territoire de la « grande région de Montréal » et le réseau routier supérieur « du MTQ », puis ensuite joindre ces deux éléments en sélectionnant seulement les tronçons d'autoroute et de route principale. Cette section décrit la procédure énoncée ci-dessous ainsi que ses hypothèses :

1. Définir le territoire de la « Grande région de Montréal »
2. Définir le réseau routier supérieur « du MTQ »
3. Sélectionner les autoroutes et les routes principales

3.2.1.1 Territoire de la grande région de Montréal

Tout d'abord, il faut définir la « grande région de Montréal ». Le territoire utilisé dans ce mémoire est celui de l'EOD de 2008 qui était disponible au moment de faire cette opération. Ce territoire est légèrement plus petit que celui de l'EOD de 2013 tel que montré à la Figure 3-7, mais puisque le projet de recherche vise principalement à faire des contributions méthodologiques c'est sans incidence.

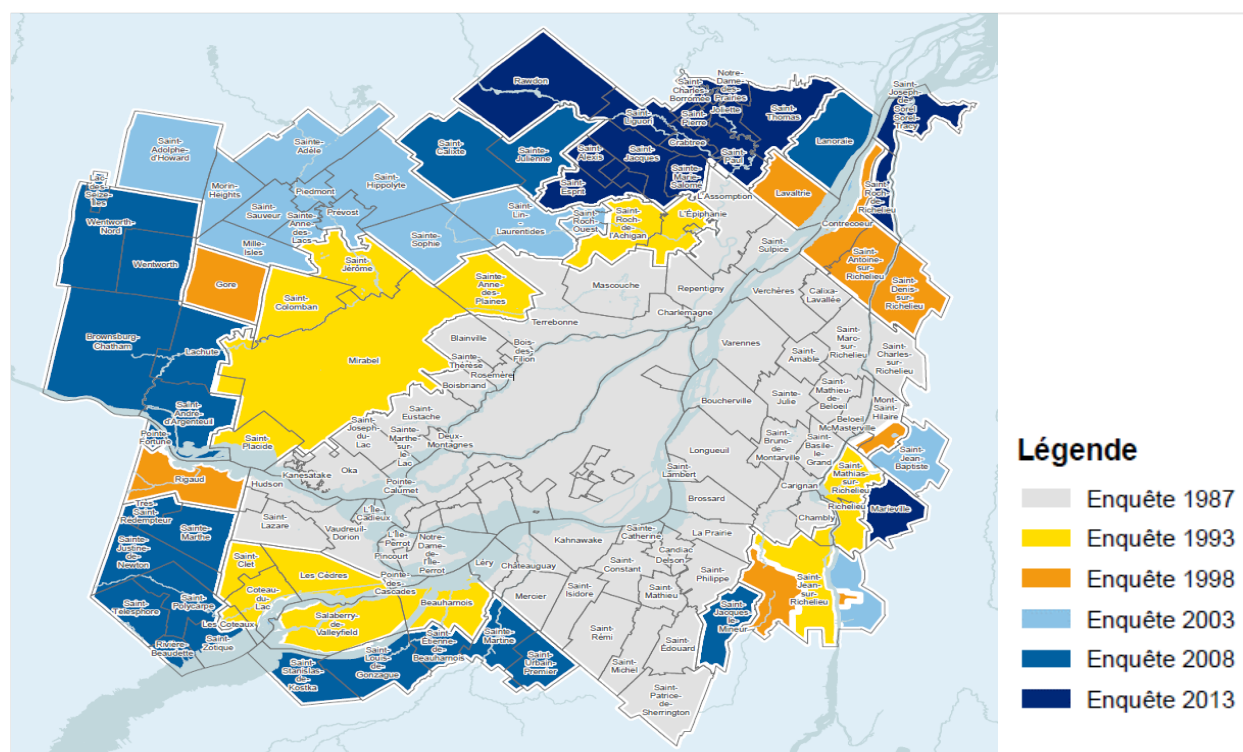


Figure 3-7 : Carte des territoires des EOD du Grand Montréal (Source : AMT, 2014)

3.2.1.2 Définition du réseau supérieur du MTQ

Ensuite, il faut déterminer un fichier de réseau routier de base. Encore une fois, plusieurs options sont à considérer qui sont toutes disponibles au format *shapefile* de polygones :

- Réseau routier national (RRN) de la Géobase
- Réseaux AQreseau (gratuit) ou AQdirection (payant) d'Adresses Québec
- **Fichier « Sous-route classifiée » fourni par le MTQ qui utilise les RTSS**
- Réseau d'Open Street Map codifié par le public selon un protocole ouvert

Le réseau choisi ici est la **Sous-route classifiée** parce qu'il utilise la nomenclature du MTQ et possède les informations nécessaires pour les besoins de l'outil. Le fichier sous-route classifiée provient de la Base géographique routière (BGR) du MTQ et utilise la codification des liens par Route-Tronçon-Section-Sous-section (RTSS) qui est reliée à plusieurs autres systèmes de données du MTQ. Le choix du fichier « Sous-route classifiée » est donc surtout lié à la possibilité de faire la connexion avec d'autres systèmes de données du MTQ. Idéalement, le réseau pourrait aussi être converti au format ouvert d'Open Street Map qui est largement déployé dans le monde et avec lequel plusieurs fonctions ont été développées, notamment des fonctions de calcul de chemin. La Figure 3-8 montre l'étendue du fichier sous-route classifiée sur le territoire de l'EOD 2008.

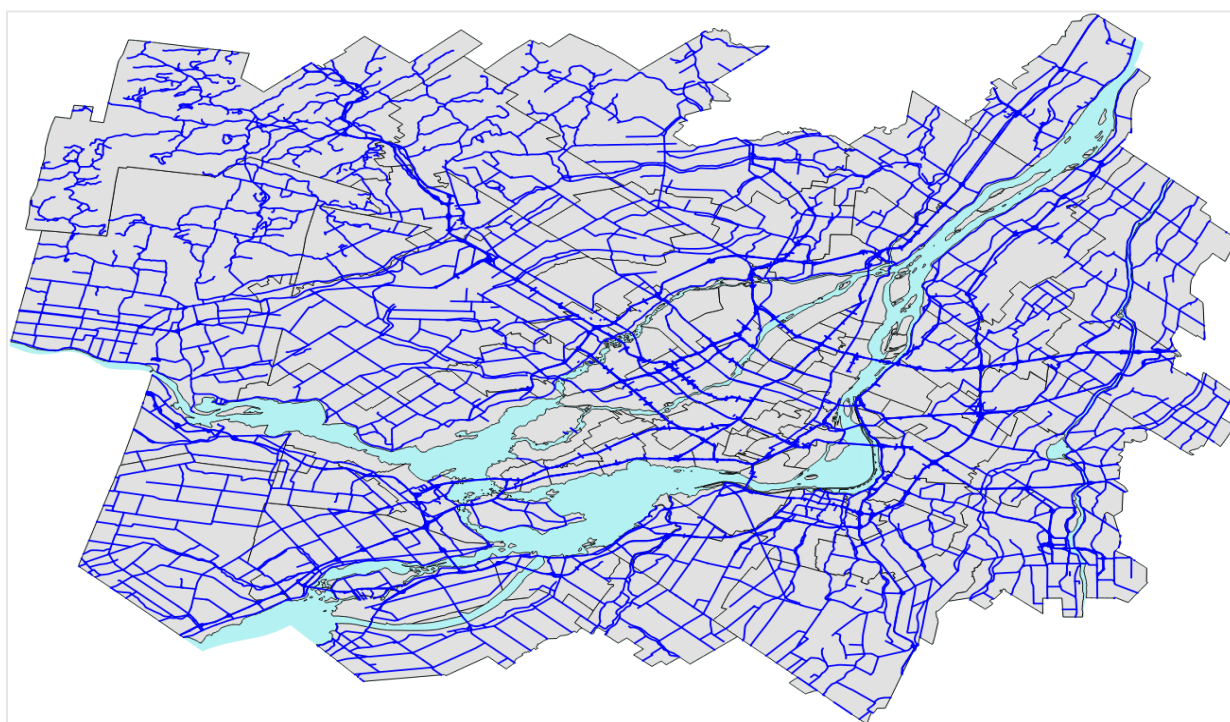


Figure 3-8 : Carte des sous-routes classifiées sur le territoire de l'EOD 2008

3.2.1.3 Sélection des autoroutes et routes principales

Le réseau visé pour ce projet est le réseau « sous la juridiction du MTQ », souvent appelé le « réseau supérieur ». Ce réseau inclut les autoroutes, les routes nationales, les routes régionales, les routes collectrices et les routes d'accès, le reste du réseau étant des routes locales, sous juridiction municipale. Pour les fins de l'analyse de la congestion routière, seulement les autoroutes et les routes nationales (principales) ont été sélectionnées en utilisant la numérotation du MTQ :

- **Autoroute** : Numéros de **1 à 99** et de **400 à 999**
- **Route principale** : Numéro de **100 à 199**
- Route secondaire : Numéro de 200 à 399

Cette numérotation est intégrée dans la première série de 5 chiffres de la codification RTSS qui désignent la **Route**, tel que montré à la Figure 3-9. Ainsi le premier exemple sur cette figure désigne un segment RTSS de la route principale 138, alors que les exemples suivants sont des segments RTSS de l'autoroute 20. Chaque polyligne du fichier « Sous-route classifiée » possède un code RTSS. Ce fichier contient des éléments de « route », mais également des bretelles d'accès, des voies de service, des virages en U, etc., qui sont identifiés comme **Code de sous-route**, soit le premier caractère de la quatrième série de chiffre (Sous-route). En reprenant les exemples de la Figure 3-9, les trois premiers sont des routes (code 0), le suivant un carrefour (code 3) et le dernier un virage en U (code U). Ces codes proviennent du Guide de la codification et du mesurage du réseau routier (MTQ, 2002).

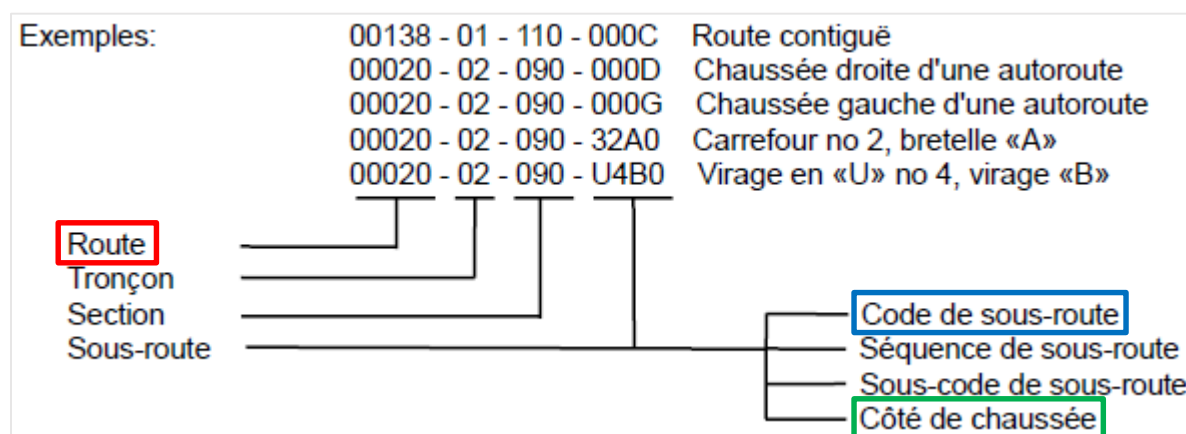


Figure 3-9 : Définition complète de la codification RTSS (Source : MTQ, 2002)

La Figure 3-10 représente le résultat de cette opération. D'autres illustrations plus détaillées du réseau sont disponibles à l'Annexe 3. Évidemment, ce résultat n'est pas final, car le réseau peut évoluer dans le temps. La sous-section suivante traite de cet aspect.

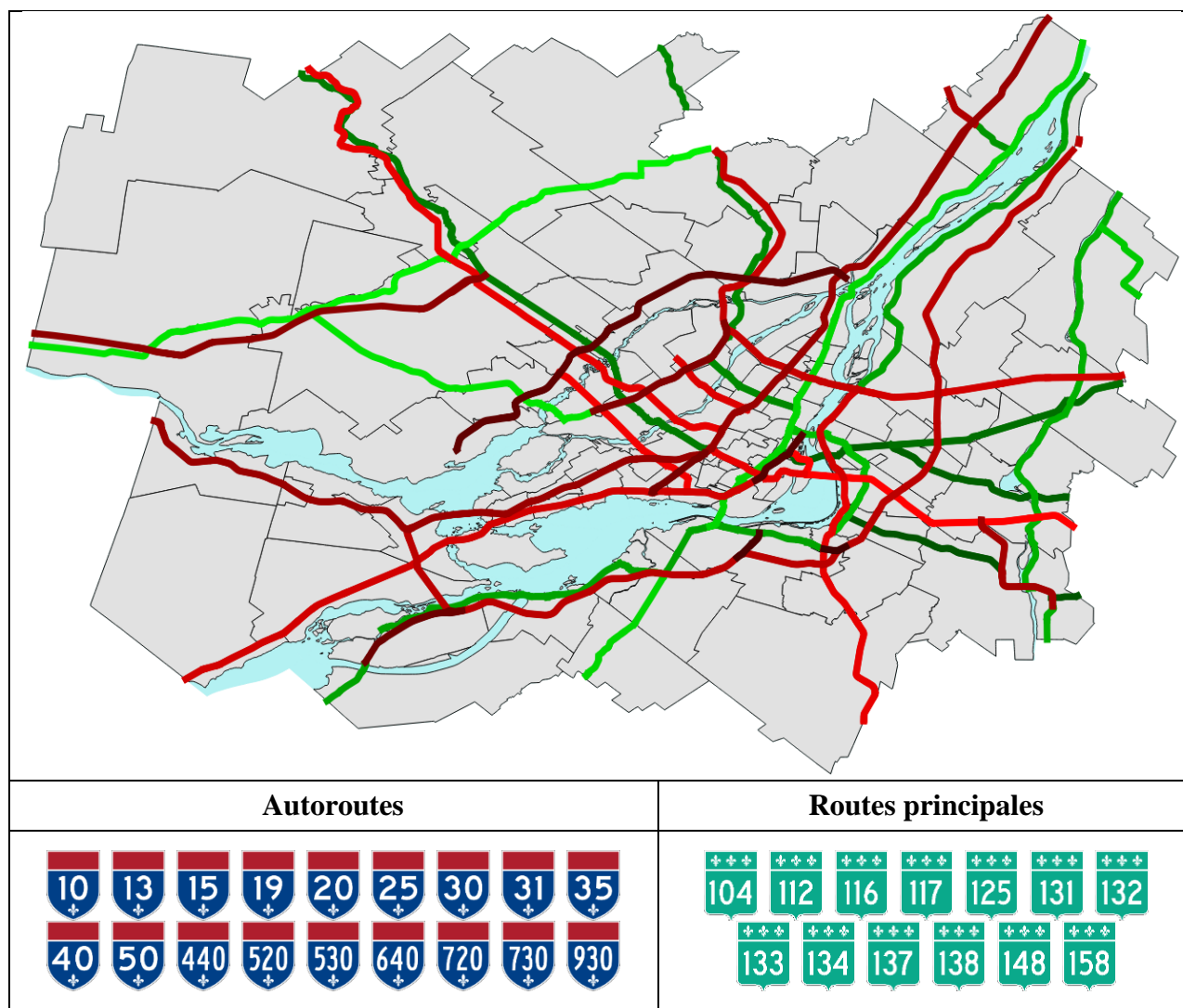


Figure 3-10 : Carte des autoroutes (rouge) et routes principales (vert) du MTQ de la région de Montréal avec les panneaux des routes identifiées

3.2.1.4 Modifications du réseau à considérer

Un enjeu majeur relié au réseau routier est l'actualisation des données. Le réseau « sous-route classifiée » utilisé dans ce mémoire est daté du 28 novembre 2013. Ayant reçu par la suite, le réseau daté du 14 mai 2015, certaines modifications ont pu être identifiées sur le réseau. La Figure 3-11 montre les modifications survenues entre le réseau de 2013 (rouge) et celui de 2015 (bleu) qui sont

le pont de contournement de l'île des Sœurs et le boulevard Pie-IX à Montréal-Nord. Il est à noter que le pont de contournement a été ouvert en octobre 2014, mais qu'il a été codifié en février 2015 dans les données du MTQ. Il sera important de tenir compte de ces dates pour garder l'outil actualisé. Par contre, dans le cadre de ce mémoire, seulement le fichier de 2013 a été utilisé, ce qui fait en sorte que certaines données GPS de la flotte de taxi « tombent dans l'eau » à l'endroit du pont de contournement dans les analyses. Cette situation devra être corrigée dans le futur, surtout avec les grands chantiers routiers en cours, notamment l'échangeur Turcot, le Pont Champlain et l'autoroute Bonaventure, qui vont décaler les polygones lors de leur ouverture respective.

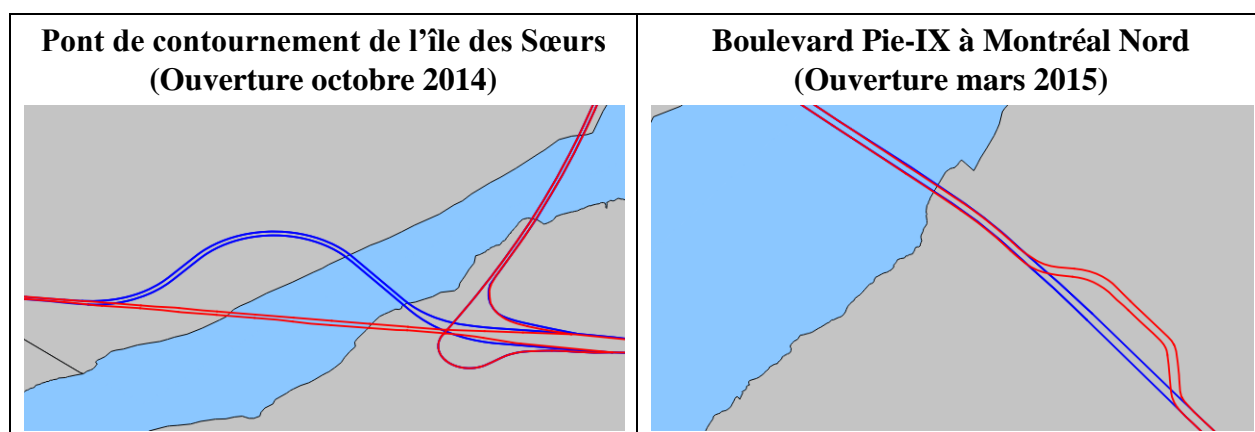


Figure 3-11 : Cartes des modifications au réseau MTQ entre le fichier « sous-route classifiée » du 28 novembre 2013 (rouge) et du 14 mai 2015 (bleu)

3.2.2 Segmentation du réseau en tronçons égaux de 100 m

Un réseau routier segmenté en unités spatiales de taille fixe permet de choisir la résolution spatiale des analyses de la congestion routière. La majorité des travaux sur la congestion aux États-Unis utilise le Traffic Message Channel (TMC) comme segmentation du réseau, parce que les données de circulation commerciales sont transmises en temps réel en utilisant cette résolution. La longueur des TMC peut varier largement, allant d'un quart de mile à plusieurs miles (INRIX, 2009), puisqu'ils sont souvent délimités par des échangeurs d'autoroutes. Morency et al. (2011) avaient utilisé le kilomètre comme niveau de résolution d'analyse spatiale pour leurs travaux sur les corridors empruntés par les véhicules flottants du MTQ. Il y a un avantage certain à segmenter le réseau en tronçons égaux au lieu d'utiliser des tronçons fixes délimités par des intersections parce

qu'il est alors possible de créer des groupes de tronçons et avoir assez d'observations pour modéliser des distributions.

Pour ce projet, le réseau routier est divisé en tronçons égaux de 100 m. Ce choix méthodologique permet de capturer plus finement les variations spatiales de la congestion. Sachant que les données de vitesse sont mesurées tous les 600 m, une résolution de 100 m est adéquate pour éviter d'avoir deux mesures du même passage d'un véhicule sur un tronçon donné, avec les données actuellement disponibles. Une méthodologie d'échantillonnage devra être développée pour intégrer les données avec une meilleure résolution temporelle. La résolution de 100 m permet aussi de regrouper les tronçons en multiples métriques intéressants, c'est-à-dire qu'on a toujours la liberté de choisir une résolution de 1 km, 500 m ou 200 m, simplement en agrégeant respectivement 10, 5 ou 2 tronçons de 100 m. Idéalement, la segmentation du réseau serait dynamique et cela reste possible avec des tronçons égaux, ce qui n'est pas aussi facile avec les TMC.

Cette section détaille les étapes menant à la segmentation du réseau routier, soit la codification d'attributs (numéro et direction), la fusion des polygones, l'algorithme de division au 100 m et le calcul de l'azimut des tronçons.

3.2.2.1 Codification d'attributs : numéro, nom et direction

Une étape préliminaire est de codifier des attributs du réseau selon le code RTSS des polygones. Tout d'abord, le numéro de la route est obtenue directement du RTSS tel qu'expliqué à la section 3.2.1.3 de ce document. Ensuite, le nom de la route a été ajouté pour chaque numéro. L'article Réseau routier québécois¹² dans Wikipédia et les articles reliés, Liste des autoroutes du Québec et Liste des routes du Québec, sont très bien rédigés et permettent de retrouver facilement l'ensemble des noms associés aux numéros des routes du Québec.

De manière générale, la direction de la route suit le côté de chaussée du RTSS tel que présenté à la Figure 3-9. La direction de la route est donc affectée selon les règles présentées au Tableau 3-2.

¹² https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_routier_québécois

Tableau 3-2 : Règles d'affectation de la direction de la route selon le RTSS

Côté de chaussée du RTSS ¹³	Route paire (ex : A20)	Route impaire (ex : A15)	Route mixte (2) (ex : A15-A20)
D (droite)	→ Est →	↑ Nord ↑	↖ NO NE ↗ ↙ SO SE ↘
G (gauche)	← Ouest ←	↓ Sud ↓	
C (contigu) (1)	Doubler la polyligne et affecter une direction par polyligne		

Deux cas particuliers sont soulevés par ces règles :

- (1) Le premier cas est celui des routes contigues (Côté de chaussée = C), c'est-à-dire que les deux directions de la route sont sur la même polyligne. C'est le cas du Pont Jacques-Cartier (R134) qui n'a qu'une seule travée bidirectionnelle. Dans ce cas, il faut doubler la polyligne et affecter une direction par polyligne en considérant si la route a un numéro pair ou impair, donc une polyligne Est et une polyligne Ouest pour le Pont Jacques-Cartier (R134).
- (2) Le second cas est celui des routes mixtes, comme le cas du Pont Champlain (A10+A15+A20). Dans ce cas, on ne peut plus utiliser seulement le côté de chaussée et il faut utiliser la logique. Par exemple, le Pont Champlain a une polyligne Nord-Ouest, parce que les autoroutes sont l'A10 Ouest, l'A15 Nord et l'A20 Ouest dans cette direction, et une polyligne Sud-Est, en direction inverse.

3.2.2.2 Fusion des routes en une seule polyligne par direction

Afin de diviser les routes en tronçons de 100 m, les polygones RTSS des routes sont d'abord fusionnées selon leurs attributs : numéro et direction. De cette manière, on obtient, par exemple, une polyligne pour l'autoroute 40 Est et une polyligne pour l'autoroute 40 Ouest. Cette opération a été réalisée avec la fonction « Rassembler plusieurs géométries dans une seule entité » de QGIS en utilisant un champ unique composé du numéro et de la direction. Cette fonction en apparence simple a nécessité plusieurs opérations de fusion manuelles pour compléter le travail, principalement dû à la manière dont les polygones ont été codifiées à la base par MTQ. Au total on dénombre **102** polygones fusionnées différentes pour le réseau étudié.

¹³ Voir Figure 3-9

3.2.2.3 Algorithme de division des polygones en tronçons de 100 m

Le logiciel PostgreSQL et les fonctions spatiales de PostGIS ont été utilisées pour diviser le réseau en tronçons de 100 m. L'algorithme utilise la fonction spatiale ST_LineSubstring qui retourne une sous-section d'une polygline comprise entre deux bornes définies par une fraction de la longueur totale de la polygline fusionnée. Afin de toujours obtenir des sous-sections de 100 m, l'algorithme est construit en utilisant une boucle de la façon suivante :

1. Posons $n = 0$ et $L =$ longueur de la polygline fusionnée
2. Extraire le tronçon de 100 m compris entre A et B en utilisant ST_LineSubstring
 - a. Où $A = 100 \times n / L$
 - b. $B = 100 \times (n+1) / L$
3. Incrémenter $n = n + 1$ et recommencer l'étape 2 jusqu'à ce que $100 \times n > L$

Après nettoyage de quelques polygones d'extrémité (longueurs < 100 m), on obtient une somme globale de 28 549 tronçons de 100 m sur tout le réseau.

3.2.2.4 Calcul de l'azimut des tronçons routiers

La fonction spatiale ST_Azimuth de PostGIS a été utilisée pour calculer l'azimut de chacun des tronçons routiers de 100 m. Cette fonction utilise les deux points extrêmes du tronçon, soit le premier et le dernier point de la polygline, en entrée pour calculer un azimut. Cette méthode fonctionne bien pour des tronçons de route de 100 m puisque les courbes sont relativement négligeables sur le réseau supérieur. Par contre, cette méthode aurait certainement des limites pour calculer l'azimut de bretelles d'autoroute ou de tronçons plus longs que 100 m. La jointure des données GPS sur le réseau en utilisant les azimuts des deux entités doit tenir compte de ces limites.

3.2.3 Codification des limites de vitesse sur le réseau

L'information sur la limite de vitesse sur les autoroutes est disponible sous plusieurs formats. Le système Gestion des limites de vitesse (GLV) du MTQ contient un historique des vitesses affichées et des modifications lors des travaux, en plus des vitesses variables. Cette base de données a initialement été créée pour répondre à un besoin légal. Chaque enregistrement est un événement de limite de vitesse avec un RTSS de début et de fin. Par contre, plusieurs sections du réseau sont manquantes et la résolution du RTSS est relativement large.

Google Maps offre depuis longtemps le service Google Street View qui permet d’avoir une vue à 360 degrés du réseau routier de la majorité de la planète et même d’autres endroits d’intérêt. Inspirée par une méthode employée par Stephen Remias de Purdue University (communication personnelle, 12 janvier 2015), la codification des vitesses affichées du réseau routier MTQ a été réalisée grâce à ces vues panoramiques. Cette méthode nécessite de codifier un à un la position des panneaux de vitesse sur le réseau routier qu’on rencontre sur un SIG. QGIS a été utilisé pour codifier les panneaux (points) qui délimitent les zones de vitesse et mettre à jour la valeur de limite de vitesse de chaque tronçon de 100 m. Le résultat est présenté à la Figure 3-12.

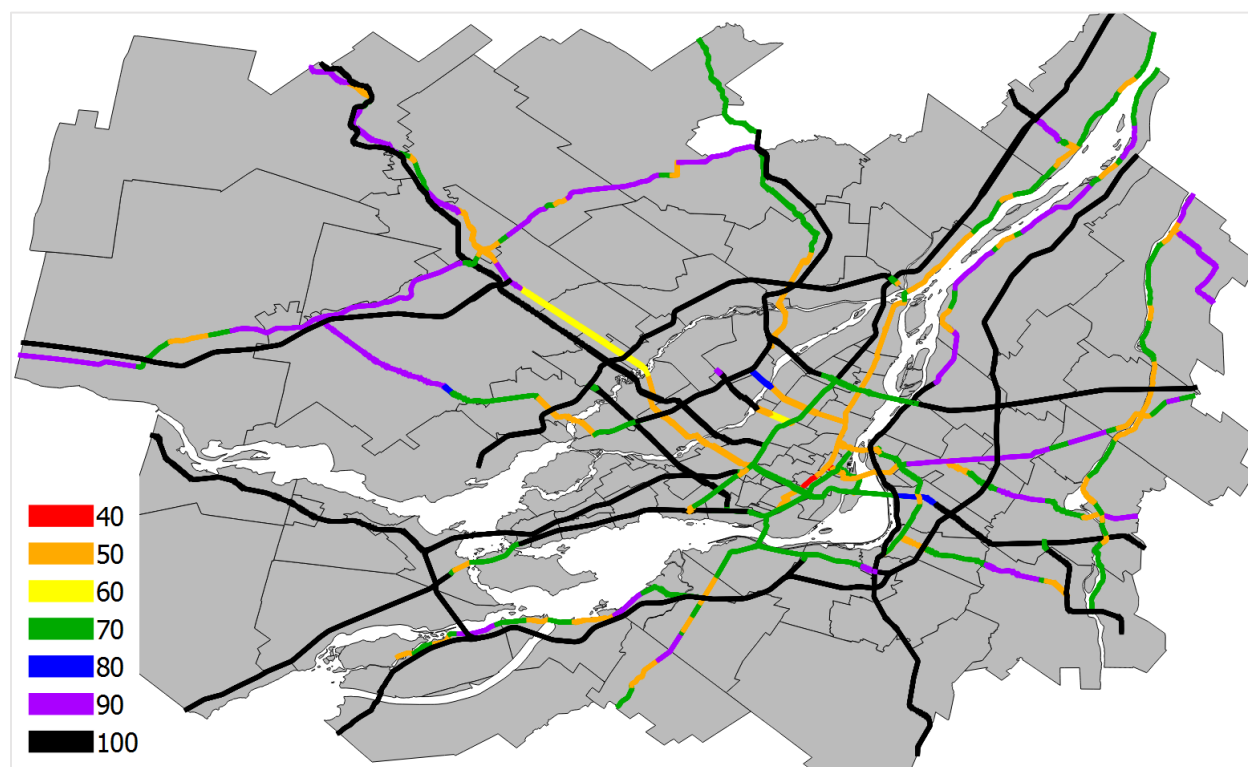


Figure 3-12 : Carte des zones de limite de vitesse (km/h) sur le réseau du MTQ telles que codifiées via Google Street View

Les données de limite de vitesse d’Adresse Québec n’étaient pas disponibles pour ce projet, mais une carte produite pour un autre projet a pu être comparée avec les données codifiées utilisant Google Street View. Cette comparaison a permis de confirmer que les données codifiées sont aussi fiables que celles d’Adresse Québec et souvent plus précises grâce à la résolution spatiale de 100 m.

Cette méthode est assez laborieuse, mais elle permet d’avoir toute la précision désirée pour délimiter les zones de limite de vitesse uniforme, ici au 100 m. De plus, elle permet d’avoir une excellente connaissance du réseau routier et de ces zones de vitesse en le parcourant en entier.

Aussi, une fois que la codification des panneaux de vitesse est faite une première fois, il est simplement nécessaire de mettre à jour les panneaux des zones qui auront changé.

Le gros inconvénient de cette méthode est que les dates de prise de vue de Google Street View ne sont pas toujours à jour. Par exemple, la Figure 3-13 est une capture d'écran de mars 2014 qui montre un panneau de limite de vitesse de 70 km/h sur l'autoroute 40 en direction est avant la jonction avec l'autoroute 520. On peut voir au bas de la fenêtre du haut que la vue a été prise en juillet 2012, un an et demi auparavant. Dans cet exemple, la limite de vitesse n'a pas changé sur l'autoroute 40 au cours des années, mais cela pourrait arriver ailleurs.

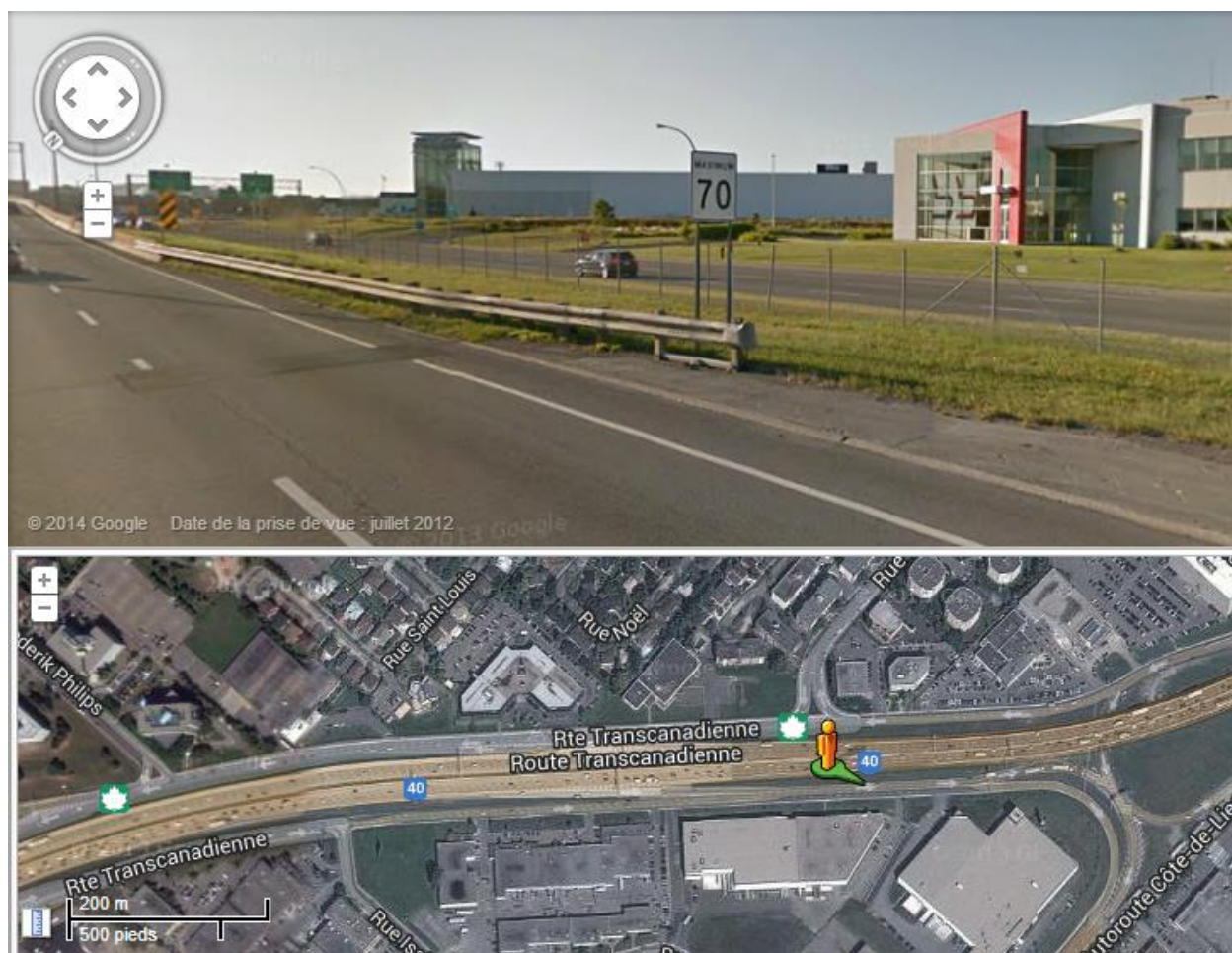


Figure 3-13 : Capture d'écran d'une interface Google Maps avec Google Street View qui affiche un panneau de vitesse sur l'autoroute 40 à Montréal (Source : Google, 2014)

Par conséquent, une combinaison des données du système GLV et de cette carte développée avec Google Street View serait idéale. Il faut noter par contre que la base de données SGE-Intervention contient une information sur la limite de vitesse sur la zone de travaux qui pourrait très bien corriger

cette carte selon les périodes temporelles d'application des vitesses affichées temporaires. Bref, il est difficile d'avoir des données précises et à jour.

3.2.4 Synthèse

Le Tableau 3-3 décrit la table de données finale du réseau routier tel qu'utilisée pour ce projet avec deux exemples pour chacun des champs. La prochaine étape est d'apparier les données GPS et le réseau routier.

Tableau 3-3 : Description de la table de données des tronçons de 100 m du réseau routier utilisés pour ce projet

Colonne	Exemple 1	Exemple 2
Identifiant unique	23542	648
Numéro de la route	40	10+15+20
Nom de la route	Autoroute Félix-Leclerc	Pont Champlain
Direction de la route	E	NO
Châinage depuis le début de la polyligne (m)	83 300	1600
Azimut (°)	32	277
Limite de vitesse (km/h)	100	70
Région (8 régions de l'EOD)	3 (Montréal-Est)	5 (Longueuil)

3.3 Appariement des données GPS et du réseau routier

Afin de calculer les indicateurs spatiotemporels de la congestion routière, il est nécessaire de créer une base de données de circulation sur le réseau routier. Cette base de données est créée par la jointure spatiale des bases de données décrites aux deux sections précédentes : les données GPS d'une flotte de taxi et le réseau routier du MTQ à Montréal. En fait, on réalise une jointure spatiale des informations du réseau aux informations des données GPS, afin de permettre d'utiliser toutes les données GPS qui sont appariées avec le réseau. La requête de jointure spatiale entre les données GPS et le réseau utilise les fonctions spatiales de PostGIS et est construite ainsi :

- Créer une table avec le sous-ensemble de données de points GPS qui vérifie les conditions ci-dessous et auxquels les informations de la polyligne de 100 m associée sont ajoutées :
 1. Le point n'a pas une vitesse et un azimuth nuls :
 - $Vitesse_{point} + Azimut_{point} \neq 0$
 2. Le point est à une distance ≤ 12 m de la polyligne :
 - `ST_DWithin` (géométrie du point, géométrie de la polyligne, 12 m)
 3. Les azimuths du point et de la polyligne doivent être dans un intervalle de 15° :
 - $ABSOLU(Azimut_{point} - Azimut_{polyligne}) \leq 15^\circ$ OU
 - $ABSOLU(Azimut_{point} - Azimut_{polyligne}) \geq (360^\circ - 15^\circ)$
- Ordonner les données selon l'identifiant unique du point GPS

La requête utilise trois critères de sélection des points : un critère de validité du point GPS, un critère de distance et un critère d'azimut. Le premier critère a été discuté à la sous-section 3.1.2.2 plus haut. Cette section décrit les hypothèses des deux premiers critères utilisés dans la requête.

3.3.1 Critère de distance ≤ 12 m

Pour apparier un point GPS d'un véhicule à une polyligne du réseau routier, il faut s'assurer que le véhicule était réellement sur le tronçon de 100 m. Puisque la polyligne n'a pas de largeur, on crée une zone tampon autour de la polyligne, dans lequel le point doit être présent. La largeur de la zone tampon représente la largeur de la route. L'information précise sur la largeur de la route sur tout le réseau n'étant pas disponible, une distance seuil a été utilisée. Cette distance doit être assez grande pour tenir compte de toutes les voies de l'autoroute et de la précision du GPS (10-15 m selon la couverture des satellites), mais ne doit pas être trop grande pour éviter d'inclure les voies de service des autoroutes. Plusieurs distances ont été testées successivement avec l'autoroute 40 à Montréal (qui a souvent une voie de service) et 12 m étaient le meilleur compromis dans la situation. Évidemment cette hypothèse pourrait être ajustée selon l'autoroute au besoin.

La Figure 3-14 montre un tronçon de l'autoroute 40 près de la jonction avec la 520 à Montréal avec la zone tampon autour de chacun des polygones de 100 m. Cette zone tampon est large de 24 m (2×12 m). On remarque que les zones tampons sont plus larges que les voies de la route, mais ne touchent tout de même pas aux voies de service à cet endroit. Il est toutefois possible que certaines données de véhicules circulant sur la voie de service « collée » sur l'autoroute soit tout de même associées à l'autoroute. L'hypothèse pourrait alors être raffinée.

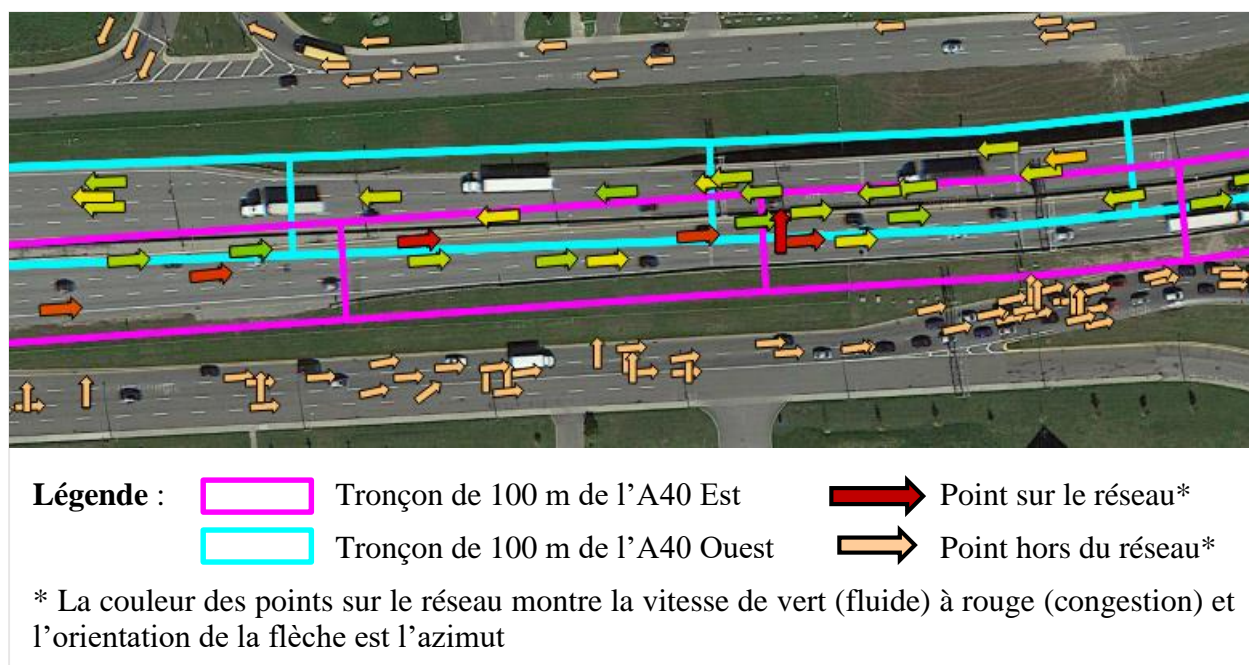


Figure 3-14 : Tronçon de l'A40 et les points GPS appariés au réseau au 30 sept. 2013

On remarque un certain chevauchement entre les tronçons est et ouest, c'est pourquoi il faut introduire le critère d'azimut pour associer le bon point au bon tronçon, aspect traité dans la prochaine sous-section. On note aussi une flèche rouge orientée vers le nord. Ce point a un azimut nul et une vitesse nulle et ne sera donc pas considéré dans la requête, conformément au troisième critère (voir 3.1.2.2).

3.3.2 Critère d'azimut à $\pm 15^\circ$

L'objectif du critère d'azimut est de ne pas associer sur une polyligne des véhicules qui roulent sur le tronçon en sens inverse ou sur un tronçon qui croise, même si les points sont contenus dans la zone tampon de cette polyligne. Ainsi, on vise que le point et la polyligne aient le même azimut pour être associés. Par contre, il faut laisser une marge de manœuvre suffisamment large pour tenir compte de l'incertitude du calcul de l'azimut et l'orientation de tronçon courbés, mais assez fine pour séparer les routes qui se croisent (comme c'est le cas lorsqu'il y a des échangeurs).

Puisque le calcul de l'azimut des tronçons de 100 m se fait en utilisant les points extrêmes du tronçon (voir 3.2.2.4), il est possible d'observer une certaine variation entre l'orientation au début du tronçon et celle à la fin du tronçon. Par contre, cette variation est essentiellement toujours plus petite que 30° . L'erreur de l'azimut calculé par le GPS n'est pas connue, mais la plupart des points

ont un azimuth similaire au tronçon, tel qu'on peut l'observer à la Figure 3-15. Sur cette figure, on peut remarquer que les points qui sont positionnés au croisement avec l'autoroute 13 (qui forme un angle de 35°) sont bien différenciés par leur azimuth. Seulement les points (flèches) qui sont dans le même axe que l'autoroute 40 y sont associés.

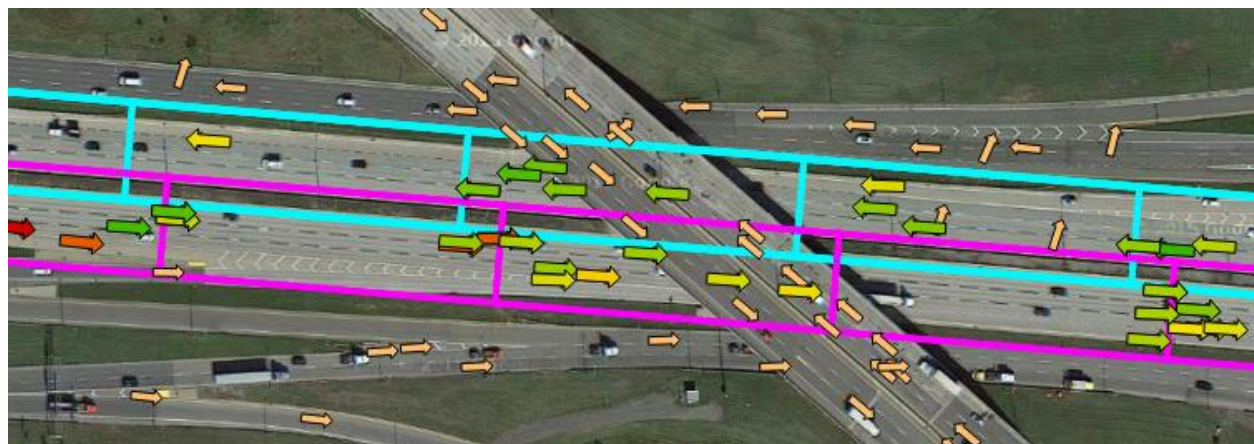


Figure 3-15 : Échangeur A40-A13 et les points GPS appariés au réseau au 30 sept. 2013

Bref, un critère d'azimut de $\pm 15^\circ$ est un bon compromis pour appairer correctement les points GPS au réseau.

3.3.3 Synthèse

À la fin de ce processus, on obtient une table qui contient les informations pour chaque point sur le réseau, c'est-à-dire qu'on ajoute les attributs des tronçons du réseau routier (colonnes du Tableau 3-3) aux attributs des points GPS qui leurs sont affectés (Tableau 3-1) pour obtenir la base de données qui sera utilisée pour étudier les conditions de circulation. En général, environ 10 % des points GPS se retrouve sur le réseau défini. Par exemple, pour octobre 2014, des 14,6 millions de points GPS, seulement 1,6 millions de points ont été appariés sur le réseau.

3.4 Données explicatives : données météorologiques

Les données explicatives permettent d'identifier des causes de la congestion récurrente et non-récurrente. Ces données permettront d'avoir une information pour expliquer les conditions de circulation sur le réseau et effectuer des analyses de corrélations pour identifier les facteurs les plus influents sur la congestion. Une série de données explicatives ont été considérées pour ce projet,

telles que les conditions météorologiques, les travaux sur le réseau, les incidents sur le réseau et autres événements spéciaux. Dans le cadre de ce mémoire, les données météoroutières sont utilisées pour développer des modèles explicatifs de la congestion au Chapitre 5. Cette section décrit la base de données météoroutières, la procédure pour obtenir une base de données temporelle et la sélection des variables d'intérêt.

3.4.1 Description de la base de données météoroutières

Au fil des ans, le MTQ a développé un vaste réseau de stations météoroutières en collaboration avec Environnement Canada (EC). Le Système de données météoroutières (SMR) du MTQ recueille les données reçues des stations météoroutières. Selon André Cantin (communication personnelle, 24 février 2015), spécialiste des stations météoroutières chez EC, les conditions peuvent être considérées comme uniformes sur l'ensemble du territoire de la grande région de Montréal, donc l'utilisation d'une seule station météorologique centrale est suffisante. La station Ste-Thérèse (voir Figure 3-16) a été choisie pour cette étude de cas.

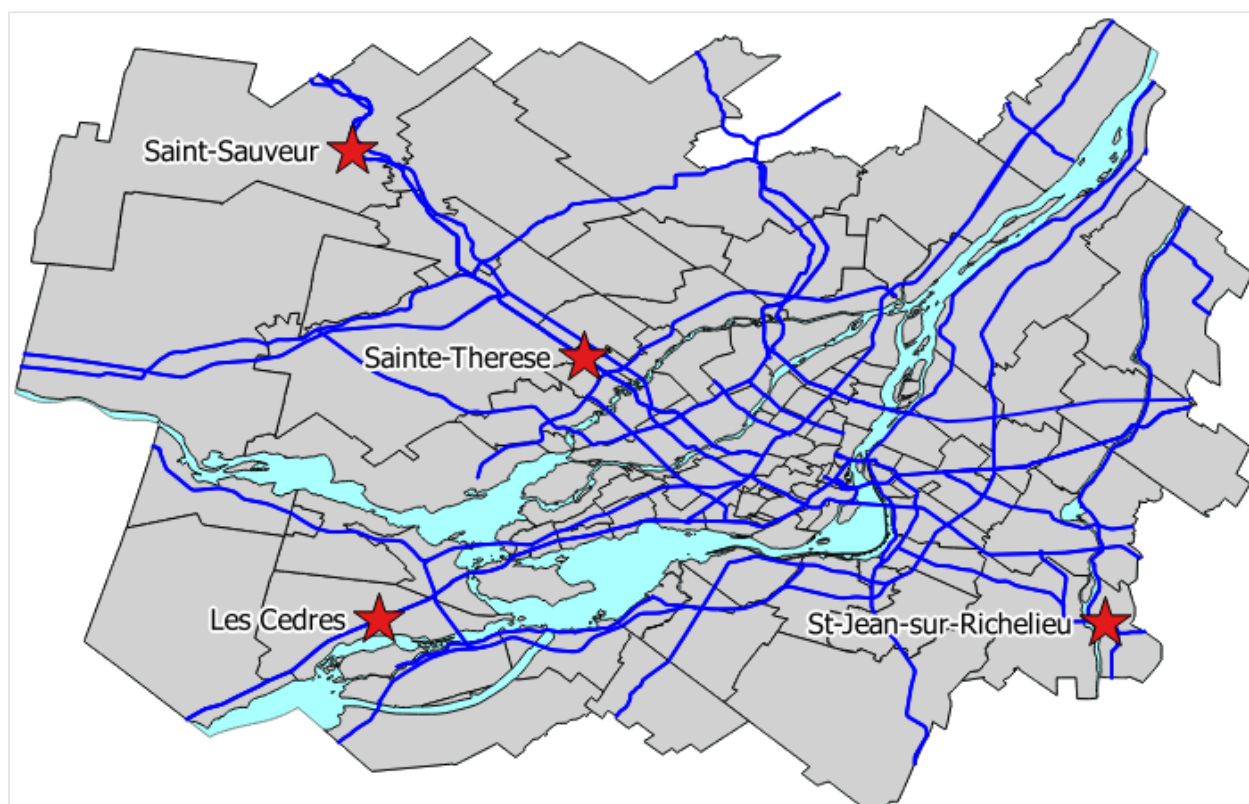


Figure 3-16 : Carte des stations météoroutières du MTQ de la grande région de Montréal

Chaque station météo est équipée de plusieurs détecteurs qui mesurent chacun plusieurs valeurs. Au total, 82 mesures sont enregistrées à une fréquence de 10 minutes. Ensuite, 15 variables d'intérêt ont été identifiées pour expliquer la congestion, telles que présentées au Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Variables météorologiques d'intérêt identifiées pour le projet

#	Type de capteur	Attribut	Description de l'attribut	Unité
1	Capteur d'air (HMP45C10)	ta_max	T° de l'air maximum	°C
2		ta_min	T° de l'air minimum	°C
3	Capteur de chaussée (LufData)	ext1temp	T° de la route à -5 cm	°C
4		ext2temp	T° de la route à -40 cm	°C
5		film_h	Épaisseur de l'eau ou de la glace	mm
6		roadcondition	Code d'état de la chaussée	
7		surftemp	T° de surface de la route	°C
8	Capteur de vent (Wind1_10)	dir	Direction moyenne vectorielle du vent	°
9		sca_spd	Vitesse moyenne du vent	km/h
10		winddir_smm	Direction au moment où le vent est max	°
11		windspd_max	Vitesse maximum du vent	km/h
12	Capteur de précipitations (WIVIS_10)	preciprate	Taux de précipitation	mm/h
13		preciptotal	Précipitation accumulée	mm
14		visibility	Distance de visibilité (0 à 3,1 km)	km
15		wcode_pres	Code du type de précipitation WMO 4680	
* Les valeurs sont représentatives des 10 minutes précédentes				

Le code d'État de la chaussée est un chiffre de 0 à 6 enregistré directement par le capteur. La définition de chacun des champs est présentée au Tableau 3-5. Le World Meteorological Organization (WMO) est une agence des Nations Unies qui standardise la collecte des données météorologiques au niveau international. Le code du type de précipitation WMO 4680 contient près de 100 codes de précipitation différents¹⁴. Un travail de simplification des nombreux codes initiaux a été réalisé pour les convertir en six codes simples qui représentent tous l'ensemble des codes initiaux fournis, présentés au Tableau 3-5. Ces codes seront utilisés dans ce mémoire.

¹⁴ <https://badc.nerc.ac.uk/data/surface/code.html>

Tableau 3-5 : Définition du code d'État de la chaussée et du code WMO 4680

Code d'État de la chaussée			Code du type de précipitation WMO 4680			
#	Définition	Traduction	# initiaux	#	Définition	Traduction
0	Dry	Sèche	0	1	None	Aucun
1	Damp	Humide	4	2	Dust	Poussières
2	Wet	Mouillée	10, 20, 30	3	Fog	Brouillard
3	Ice	Glacée	22, 51, 52, 58	4	Drizzle	Bruine
5	Residual salt	Sel résiduel	23, 61, 62, 63	5	Rain	Pluie
6	Freezing wet	Gelée mouillée	24, 71, 72, 73, 74	6	Snow	Neige

3.4.2 Conversion vers une base de données temporelle

Les données météorologiques fournies étaient seulement disponibles pour l'année 2014, à raison d'un fichier CSV par mois par capteur. Afin de les combiner aux données de circulation, la procédure suivante a été utilisée :

1. Importation de tous les CSV dans PostgreSQL (une table par attribut du Tableau 3-4);
2. Sélection uniquement des variables (tables) d'intérêt;
3. Création d'une base de données pour chaque date-heure de 2014
 - (365 jours × 24 heures = 8760 enregistrements)
4. Jointure temporelle entre les variables d'intérêt et la table de toutes les date-heures;
5. Agrégation à l'heure (6 valeurs par heures) :
 - Moyenne des variables numériques continues moyennes
 - Maximum des variables numériques continues maximales
 - Mode pour les variables catégorielles

La table finale contient 8192 lignes, car certaines date-heures qui ne contenaient pas de données, dont une absence des données du 23 septembre au 16 octobre 2014. Le Tableau 3-6 montre le début de la table météorologique temporelle. Les variables disponibles dans la table sont les mêmes que celles présentées au Tableau 3-4 avec un horodatage (dateheure). Cette table est utilisée pour effectuer une jointure temporelle des données météorologiques avec les données de circulation, tel qu'expliqué à la sous-section suivante.

Tableau 3-6 : Échantillon de la table de données météorologiques temporelle

dateheure	ta_max	ta_min	ext1temp	ext2temp	film_h	roadcondition	surftemp	...
2014-01-01 00:00	-18,3	-18,5	-14,4	-9,5	0,2	3	-15,8	...
2014-01-01 01:00	-18,8	-19,1	-15,1	-9,5	0,2	3	-17,2	...
2014-01-01 02:00	-19,8	-20,3	-15,8	-9,6	0,5	3	-18,1	...
2014-01-01 03:00	-21,2	-21,6	-16,5	-9,7	0,5	3	-19,0	...
2014-01-01 04:00	-21,1	-21,4	-17,0	-9,8	0,4	3	-19,4	...
2014-01-01 05:00	-21,5	-21,9	-17,3	-9,9	0,2	3	-19,5	...
2014-01-01 06:00	-21,5	-22,3	-17,4	-10,1	0,1	3	-19,1	...

...	dir	sca_spd	winddir1_smm	windspd1_max	preciprate	preciptotal	visibility	wcode_pres
...	291,3	7,7	229,0	12,9	0,0487	84,48	0,172	61 → 5
...	319,6	4,2	317,9	6,6	0,0013	84,49	1,380	30 → 3
...	209,1	3,5	268,1	5,2	0,0000	84,49	3,100	24 → 6
...	231,5	4,1	223,6	6,5	0,0000	84,49	3,100	10 → 3
...	264,5	5,1	257,8	8,0	0,0000	84,49	3,100	4 → 2
...	243,9	2,3	261,3	5,3	0,0000	84,49	3,100	4 → 2
...	234,6	3,7	249,2	6,3	0,0000	84,49	3,100	4 → 2

3.4.3 Intégration des données météo aux données de circulation

La procédure d'intégration des données météo aux données de circulation est une simple jointure temporelle : **Date-Heure** Météo = **Date-Heure** Circulation.

Afin de construire une base de données cohérente pour fins de modélisation (chapitre 5), il faut s'assurer qu'il n'y ait aucun enregistrement vide (NULL) en utilisant une jointure (INNER JOIN). La Figure 3-17 A schématise cette procédure. L'hypothèse d'utiliser seulement une station météorologique simplifie considérablement la jointure, puisqu'elle n'utilise qu'une seule dimension, soit la dimension temporelle.

Si on utilisait plusieurs stations météorologiques (Figure 3-17 B), on devrait maintenant ajouter une dimension spatiale à la jointure interne :

$$\text{Tronçon-Date-Heure Météo} = \text{Tronçon-Date-Heure Circulation}$$

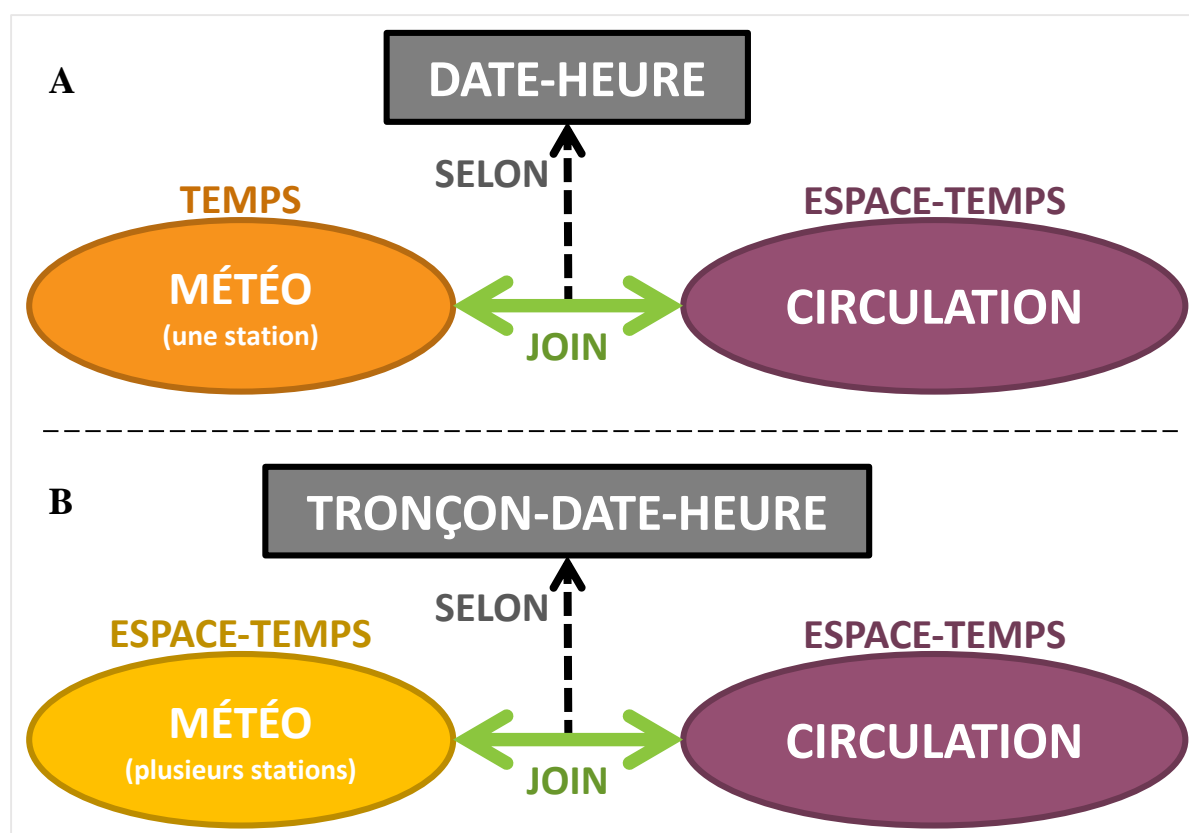


Figure 3-17 : Schémas de la jointure entre données de circulation et données explicatives

Par conséquent, la table de données explicatives se doit d'utiliser le tronçon-date-heure comme unité de base. C'est d'ailleurs évident si on considère des données de travaux qui ont une dimension spatiotemporelle. Ainsi, contrairement à la procédure de la sous-section précédente, les données de travaux doivent être converties vers une table spatio-temporelle, tout comme la majorité des données explicatives.

3.5 Calcul des indicateurs

Plusieurs indicateurs ont été relevés dans la revue de littérature au chapitre précédent. Tel que mentionné, l'intérêt est surtout au niveau du développement d'une méthodologie d'estimation des indicateurs dans l'optique d'un outil d'analyse et de suivi. Les indicateurs choisis sont simples mais restent pertinents. Également, puisque des données de débits de circulation n'étaient pas disponibles en continu sur l'ensemble du réseau, les indicateurs reposant sur ces mesures ont été écartés pour le moment.

3.5.1 Équations des indicateurs

Pour ce mémoire, sept indicateurs sont utilisés : la vitesse moyenne, le ratio de la limite de vitesse, le temps de parcours moyen et cumulé, le retard moyen et cumulé et le pourcentage en congestion. Ces indicateurs utilisent les valeurs de vitesses mesurées et de limite de vitesse de la base de données de circulation et sont calculés pour chaque tronçon (t) ou série de n tronçons et pour chaque période (p) selon les équations présentées au Tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Équation des indicateurs utilisés

#	Indicateur	Équation
1	Vitesse moyenne	$V_{\text{moy (t,p)}} = \frac{\sum \text{Vitesse instantanée (t, p)}}{\text{Nombre d'observations (t, p)}}$
2	Ratio de la limite de vitesse	$RLV_{(t,p)} = \frac{V_{\text{moy (t, p)}}}{V_{\text{limite (t)}}} \times 100\%$
3	Temps de parcours moyen	$T_{\text{moy (t,p)}} = \frac{\text{Longueur (t)}}{V_{\text{moy (t, p)}}}$
4	Temps de parcours cumulé (total)	$T_{\text{tot (t,n,p)}} = \sum_{i=1}^n T_{\text{moy (t_i,p)}}$
5	Retard moyen	$R_{\text{moy t,p}} = \max\left(0, \frac{L(t)}{V_{\text{lim (t)}}} - \frac{L(t)}{V_{\text{moy (t,p)}}}\right)$
6	Retard moyen cumulé (total)	$R_{\text{tot (t,n,p)}} = \sum_{i=1}^n R_{\text{moy (t_i,p)}}$
7	Pourcentage en congestion	$\%_{\text{congestion}} = \frac{\# \{RLV_{(t,p)} < 60\%\}}{\# \text{ total}}$
Légende : t = tronçon n = nombre total p = période i = index V = vitesse T = temps de parcours R = retard L = longueur tot = total moy = moyen(ne) aff = affichée # = nombre		

3.5.2 Seuil d'acceptabilité de la congestion

Tel que discuté aux sections 2.1.2 et 2.1.1, la littérature propose plusieurs définitions de la congestion et il y a plusieurs seuils d'acceptabilité de la congestion utilisés. Ainsi, le seuil doit être

défini par l'analyste selon la finalité de l'indicateur. Pour les fins de ce mémoire, le seuil d'acceptabilité de la congestion est fixé à 60% de la limite de vitesse. Même si ce seuil est arbitraire, ce choix méthodologique de fixer une valeur est en concordance avec des travaux précédents réalisés pour le compte du MTQ (Gourvil et Joubert, 2004; Robitaille et Nguyen, 2003).

Plusieurs chercheurs suggèrent d'utiliser la vitesse en écoulement libre comme vitesse de référence au lieu de la limite de vitesse, comme c'est le cas pour calculer le Travel Time Index. Par contre, une méthode répandue pour calculer la vitesse en écoulement libre à partir des données de vitesse est de prendre le 85^e centile des vitesses observées durant la nuit en fixant une limite supérieure égale à la limite de vitesse sur les autoroutes (Schrack et al. 2012). Cette limite est fixée pour obtenir une estimation « raisonnable » du retard. Par conséquent, le choix de la limite de vitesse pour le calcul du retard est donc raisonnable.

D'autre part, l'utilisation de la limite de vitesse au lieu de la vitesse en écoulement libre est aussi justifiée en regard de la perception des automobilistes. Tel que discuté précédemment, la perception de la congestion varie beaucoup dans la population, selon le lieu et la période, et il n'y a pas de seuil généralement connu à partir duquel un usager de la route accepte ou non un retard. Par contre, la seule référence de vitesse fixe sur la route est la limite de vitesse. Les usagers n'ont probablement pas tous la même définition de la vitesse en écoulement libre, mais ont assurément la même définition de la limite de vitesse. De plus, ceux-ci s'attendent probablement à rouler au moins aussi rapidement que la limite de vitesse, peu importe leur perception. La limite de vitesse devient donc la « vitesse désirée », « acceptée » ou « ciblée » pour les usagers de la route, tout comme pour les policiers et le code de la sécurité routière.

En résumé, l'hypothèse de seuil d'acceptabilité de la congestion est de **60 % de la limite de vitesse** pour deux raisons :

1. un seuil acceptable de 60 % pour reprendre des travaux précédents reliés au MTQ;
2. la limite de vitesse comme vitesse de référence parce qu'elle est la seule vitesse de référence fixe sur la route et qu'on peut supposer qu'elle est également la vitesse ciblée, peu importe la perception des usagers.

La Figure 3-18 schématise le seuil d'acceptabilité de la congestion choisi et la nomenclature qu'elle implique. Il y a trois niveaux de circulation : fluide, intermédiaire et en congestion. Ces niveaux sont reliés au pourcentage du Ratio vitesse moyenne / limite de vitesse (RLV) qui a deux seuils :

60 % (seuil d'acceptabilité) et 100 % (limite de vitesse). Ainsi, tout ce qui est au-delà de la limite de vitesse est considéré comme écoulement libre (aucune congestion), tout ce qui est sous le seuil d'acceptabilité est non-acceptable (congestion non-acceptable), et la partie entre les deux seuils est considérée comme la zone intermédiaire où la congestion est acceptable et l'état de la circulation en transition. Cette dernière zone est évidemment subjective et pourrait être ajustée suite à une étude plus poussée sur la perception de la congestion.

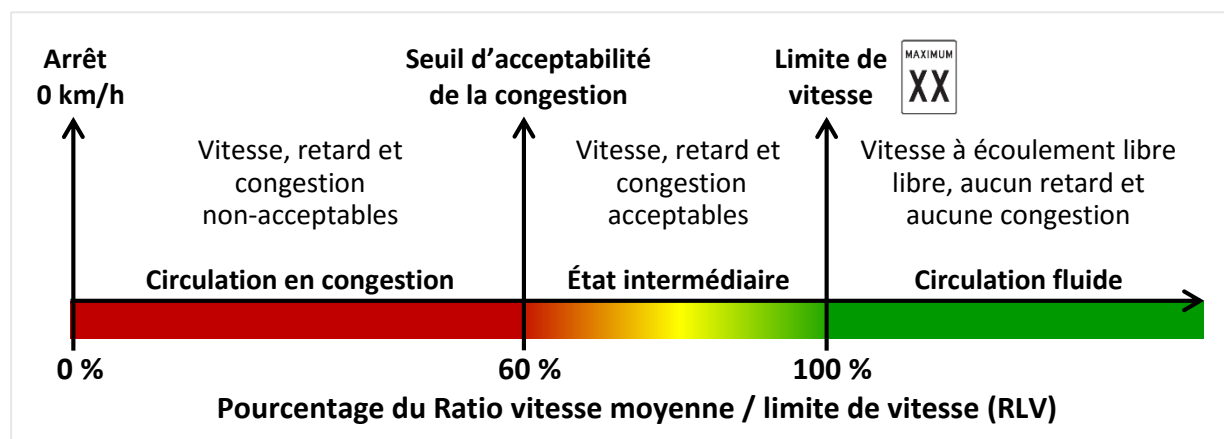


Figure 3-18 : Schématisation et nomenclature du seuil d'acceptabilité de la congestion

Par ailleurs, pour définir un seuil d'acceptabilité de la congestion selon la perception des automobilistes, il serait possible d'effectuer un sondage auprès de ces personnes. Un prototype de sondage sur la perception de la congestion est présenté à l'Annexe 3.

3.6 Objets de visualisation

Cette section présente la méthodologie de création des quatre objets de visualisation utilisés dans ce mémoire, soit la distribution, la courbe cumulée, la grille de congestion et la carte de congestion. Chaque objet de visualisation est utilisé pour représenter un indicateur selon l'objet d'étude sélectionné (corridor, segment, point d'accès et réseau). Les différents outils utilisés pour produire ces objets de visualisation sont principalement Microsoft Excel pour les trois premiers objets et Quantum GIS pour les cartes. Il est à noter qu'une requête spatiotemporelle dans la BD circulation contenue dans PostgreSQL, dont le résultat est exporté vers Excel, est la première étape sous-entendue de chacune des méthodes de création des objets de visualisation. Le chapitre 4 présente

des exemples concrets pour chaque objet de visualisation, et ce, dans le même ordre que cette section présente leur méthodologie de création.

3.6.1 Distribution

La distribution est l'objet de visualisation de base. Microsoft Excel permet facilement de développer plusieurs types de distribution (histogramme, graphique à barres, courbe ou nuage de point), selon plusieurs séries qui peuvent être comparées ou empilées. L'ordonnée est généralement utilisée pour représenter l'indicateur et l'abscisse pour représenter l'intervalle spatial ou temporel, graduée selon la résolution sélectionnée. Les séries de données sont souvent les différents niveaux de la résolution sélectionnée, par exemple le jour de la semaine ou le corridor. La section 4.2 présente plusieurs exemples de distributions.

3.6.2 Courbe cumulée

L'idée de la courbe cumulée vient de la nécessité de suivre l'évolution des conditions de circulation sur les multiples approches menant à un point d'accès, par exemple l'approche du Pont Champlain vers Montréal (voir section 4.1.2). Puisque plusieurs corridors convergent parfois en un seul corridor vers un point d'accès, si on veut évaluer le temps de parcours à l'approche du point d'accès, il est nécessaire de produire un résultat différent par itinéraire. Si on veut observer le résultat de toutes les approches en même temps, il faut construire une arborescence dont la racine est le point d'accès et les branches sont les différents corridors routiers menant au point d'accès. Cette arborescence est nommée courbe cumulée, car les indicateurs utilisés (temps de parcours et retard) sont cumulés du point d'accès (aval) jusqu'aux extrémités des corridors (amont). Cette section présente la matrice de connexité et l'algorithme utilisés pour construire la courbe cumulée, dont plusieurs exemples sont présentés à la section 4.3.

3.6.2.1 Matrice de connexité

Afin de connecter les différents liens routiers ensemble, il faut définir une matrice de connexité des points d'intersection entre chaque lien. Le Tableau 3-8 montre la matrice utilisée pour l'objet d'étude du Pont Champlain vers Montréal. La Figure 3-19 schématise les chaînages des différents liens pour mieux expliquer la matrice. Tout d'abord, il faut comprendre que les chaînages utilisés dans ce projet ne sont pas les mêmes chaînages que le réseau réel du MTQ, mais plutôt un chaînage

depuis le début de la polyligne. C'est donc plutôt un chaînage interne à la polyligne de la route complète. Le Tableau 3-8 indique donc que la 134 E est connectée à la 10 O aux chaînages 8,800 de la 134 E et 2,200 de la 10 O respectivement. En d'autres mots, le chaînage 8,800 de la 134 E est celui qui est connecté au chaînage 2,200 de la 10 O, tel qu'on peut le voir à la Figure 3-19.

Tableau 3-8 : Matrice de connexité de l'approche du Pont Champlain vers Montréal

Chaînage interne (m)		DESTINATION (route qui croise)							
		Pont C.	10 O	132 E	132 O	134 E	134 O	30 E	30 O
ORIGINE (route analysée)	Pont C.	-	3,500						
	10 O	0,000	-	0,000	0,000	2,200	2,200	6,100	6,100
	132 E		10,700	-					
	132 O		0,000		-				
	134 E		8,800			-			
	134 O		8,900				-		
	30 E		67,600					-	
	30 O		67,500						-

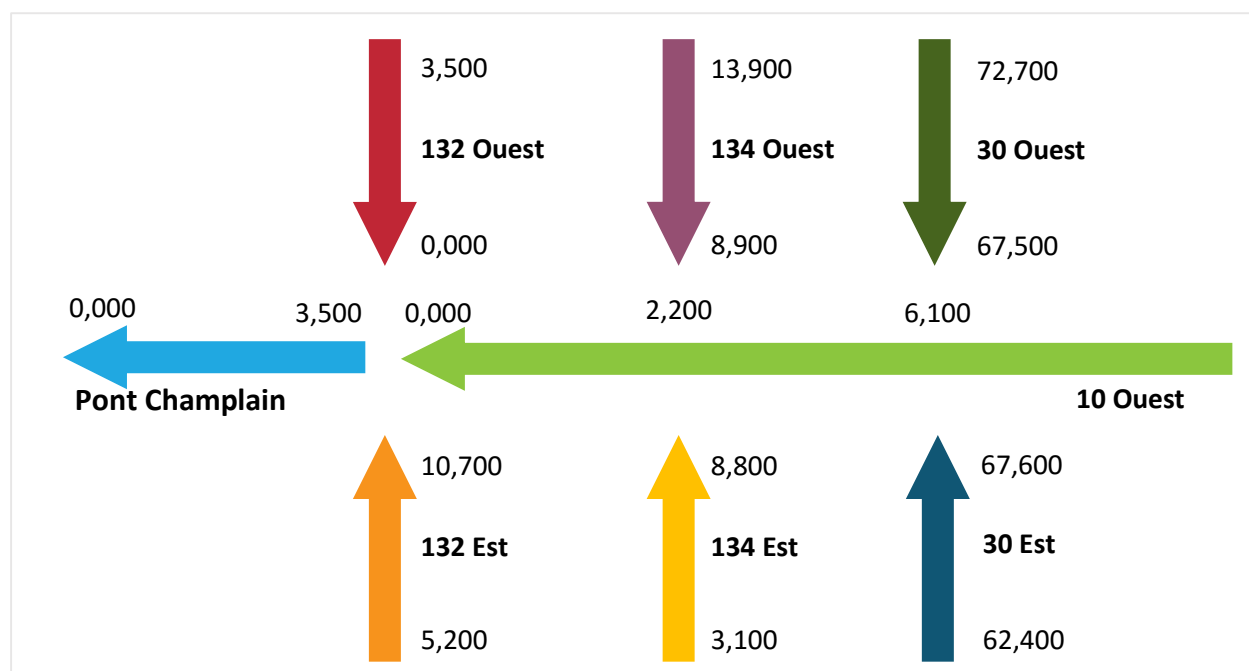


Figure 3-19 : Chaînages des corridors de l'approche du Pont Champlain vers Montréal

3.6.2.2 Algorithme de construction

Une fois la matrice de connexité construite, on peut utiliser l'algorithme de construction de la courbe cumulée du temps de parcours développé avec Microsoft Excel :

- Convertir les chaînages en distance à partir de l'extrémité avec le plus faible chaînage
- À l'aide du Tableau croisé dynamique (TCD), créer une matrice des vitesses moyennes :
(ligne \times colonne = distance \times corridor)
- Lisser spatialement selon le critère désiré pour s'assurer d'avoir suffisamment de données
(moyenne mobile sur 1 km pour l'approche du Pont Champlain à Montréal)
- Calculer le temps de parcours (Équation 3) pour chaque cellule (distance \times corridor)
- Connecter les chaînages selon la matrice de connexité convertie en distance
 1. Inverser les cellules des colonnes pour les corridors dont la direction est inverse au sens du chaînage
 2. Décaler les cellules pour que les chaînages connectés soient sur la même ligne
 3. Uniformiser la valeur de temps de parcours pour les cellules connectées
- Cumuler le temps de parcours (Équation 4) par unité de distance (tronçon)
- Insérer un graphique « nuage de points avec courbe » à partir de la matrice finale

La numérotation des équations des indicateurs fait référence au Tableau 3-7.

Cet algorithme est la base pour obtenir la courbe cumulée du temps de parcours. Pour la courbe cumulée du retard, il faut ajouter quelques étapes :

- Dupliquer la matrice finale obtenue
- Recalculer le temps de parcours cumulé en utilisant maintenant la limite de vitesse
- Calculer le retard pour chaque cellule dans une nouvelle matrice (Équation 6)
- Insérer un graphique « nuage de points avec courbe » à partir de cette dernière matrice

Cet algorithme n'a pas été automatisé pour tous les points d'accès dans le cadre de ce mémoire, mais il pourrait très bien être automatisé pour un outil de consultation.

3.6.3 Grille de congestion

On retrouve souvent l'illustration des conditions de circulation par une grille de chaleur dans la littérature, comme l'exemple montré à la Figure 2-4. Cet objet de visualisation a été développé pour l'indicateur du ratio de la limite de vitesse (RLV) en utilisant Microsoft Excel dans le cadre de ce mémoire. Voici la procédure à suivre :

- À l'aide du TCD, créer une matrice spatiotemporelle du RLV moyen :
(résolution spatiale \times résolution temporelle, Ex : 100 m \times 15 minutes)
- Appliquer une mise en forme conditionnelle à chacune des cellules de la matrice :
Ex : Échelle à trois couleurs : minimum = 0,6; milieu = 0,8; maximum = 1,0

La section 4.4 montre quelques exemples de grille de congestion du ratio de la limite de vitesse selon l'objet d'étude. Cette procédure peut évidemment s'appliquer à d'autres indicateurs. La règle de couleur de la mise en forme conditionnelle fait référence au seuil de congestion discuté à la section 3.5.2 de ce chapitre. Cette règle devrait également pouvoir être modifiée par l'analyste dans le cadre d'un outil de consultation automatisé.

3.6.4 Carte de congestion

La carte est l'objet de visualisation des conditions de circulation qui est le plus intuitif. Dans le cadre de ce mémoire, le logiciel libre et gratuit Quantum GIS (QGIS) a été utilisé pour produire les différentes cartes. La procédure suivante est suivie :

- À l'aide du TCD, créer une table avec une seule valeur d'indicateur par identifiant de tronçon
- Importer la table dans QGIS au format CSV (sans géométrie)
- Joindre les données de la table d'indicateur à la couche du réseau routier dans QGIS
- Modifier la mise en forme de la couche géographique pour afficher l'indicateur sur la carte :
Ex : Catégoriser la vitesse moyenne par intervalles de 20 km/h
- Ajouter un fond de carte :

Ex : fournisseur de carte en ligne (*Google Maps*) ou *shapefile* du territoire de l'EOD

Plusieurs cartes ont été produites à la section 4.5, selon différents objets d'étude.

3.7 Agrégation des données selon la sélection spatiotemporelle

Une fois que l'indicateur de la congestion routière et l'objet de visualisation sont sélectionnés, il faut une sélection spatiotemporelle pour afficher les résultats agrégés. Par contre, puisqu'il n'y a pas de données de vitesse à chaque heure et à chaque tronçon de 100 m du réseau (chaque unité de tronçon-date-heure), il faut souvent décider du niveau d'agrégation du résultat en fonction du nombre de données disponibles. Cette section décrit les multiples sélections spatiotemporelles, la taille de l'échantillon disponible, l'arbre de décision lorsque le nombre de données est insuffisant et la méthode de la moyenne mobile pour agréger les résultats.

3.7.1 Sélections spatiotemporelles

Il est intéressant d'analyser et de suivre l'état de la congestion routière selon différentes unités d'espace et de temps. Essentiellement, il y a quatre types de sélection : un intervalle spatial, un intervalle temporel, une résolution spatiale et une résolution temporelle. Le Tableau 3-9 montre des exemples pour chacun des types. De plus, il peut y avoir plusieurs sélections pour un même type. Par exemple (voir Figure 4-9) :

- *Intervalle spatial* : l'autoroute 40, en direction ouest, entre les deux autoroutes 15;
- *Intervalle temporel* : du 1^{er} janvier 2012 au 30 septembre 2013, du lundi au vendredi;
- *Résolution spatiale* : par tronçons de 100 m;
- *Résolution temporelle* : par groupe de 3 heures.

Tableau 3-9 : Sélections spatiotemporelles pour calculer les indicateurs de la congestion

	Sélections spatiales	Sélections temporelles
Intervalle	<i>De où à où ?</i> <ul style="list-style-type: none"> • Point de début à point de fin • Tronçons entre deux échangeurs • Direction de la route (ex : <i>nord et sud</i>) • Accès à un pont, échangeur • Zone impactée / Groupe de routes 	<i>De quand à quand ?</i> <ul style="list-style-type: none"> • Date de début à date de fin • Heures (ex : <i>6h00 à 9h00</i>) • Jours (ex : <i>Lundi au vendredi</i>) • Mois (ex : <i>Septembre à décembre</i>) • Années
Résolution	<ul style="list-style-type: none"> • 100 m, 200 m, 500 m, 1 km • Route ou corridor • Zone de vitesse • Région • Réseau entier 	<ul style="list-style-type: none"> • Heure / Groupe d'heures • Jour / Jour de la semaine • Semaine • Mois • Année

Par contre, il n'est pas toujours possible de produire des résultats cohérents pour tous les paramètres spatiotemporels sélectionnés, puisqu'il n'y a pas toujours suffisamment de données disponibles pour la résolution désirée. Il est donc nécessaire de regarder le nombre de données (points GPS) disponibles et de choisir une résolution moins fine selon certaines méthodes présentées dans les sous-sections suivantes.

3.7.2 Taille de l'échantillon disponible

Une étape importante est de regarder la distribution des données dans le temps et l'espace, afin de vérifier que la taille de l'échantillon est suffisant pour la résolution d'analyse désirée. La Figure 3-20 a) montre que le nombre d'observations varie fortement sur la longueur de l'autoroute 40 par exemple. L'échelle logarithmique permet de voir les grandes différences d'ordre de grandeur entre le plus faible nombre de points sur un tronçon de 100 m (58) et le plus grand nombre (14 644), pour la période du 1^{er} janvier 2012 au 30 septembre 2013. La distribution du nombre de données selon l'heure et le jour de la semaine (Figure 3-20 b) permet de remarquer la différence de l'utilisation du taxi en semaine par rapport à la fin de semaine. Ce graphique montre aussi qu'il y a environ 12 000 points par heure durant l'heure de pointe du matin en semaine, ce qui est relativement peu sur une période de plus de 20 mois et pour une autoroute de plus de 50 km dans

chaque direction. Par conséquent, on peut s'attendre à devoir agréger les échelles spatiales ou temporelles pour l'évaluation des indicateurs.

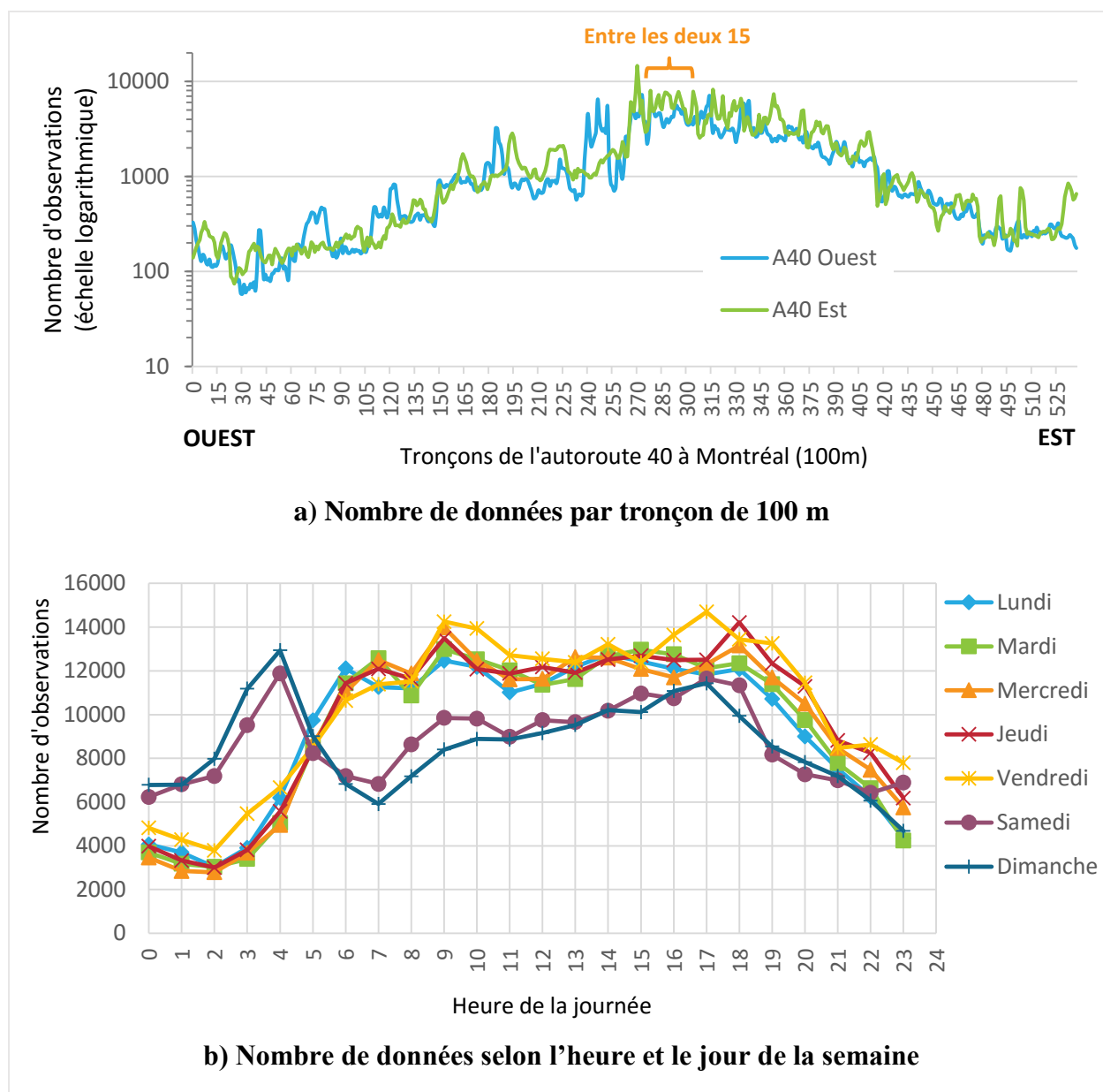


Figure 3-20 : Nombre de données de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal de janvier 2012 à septembre 2013

La Figure 3-21 montre le pourcentage des tronçon-date-heure (unité d'analyse de base) selon le nombre de données de circulation (points GPS sur le réseau) qui lui sont associées. On remarque rapidement que la grande majorité des TDH n'ont aucune donnée de circulation. 92% des TDH sur l'ensemble de l'autoroute 40 à Montréal (Figure 3-21 a) n'ont aucune donnée et seulement 7% des TDH ont un point GPS associé. En considérant seulement la portion de l'autoroute 40 qui se situe entre les deux autoroutes 15, qui est davantage fournie en données selon la Figure 3-20 a), on retrouve tout de même 79% des TDH sans données de circulation.

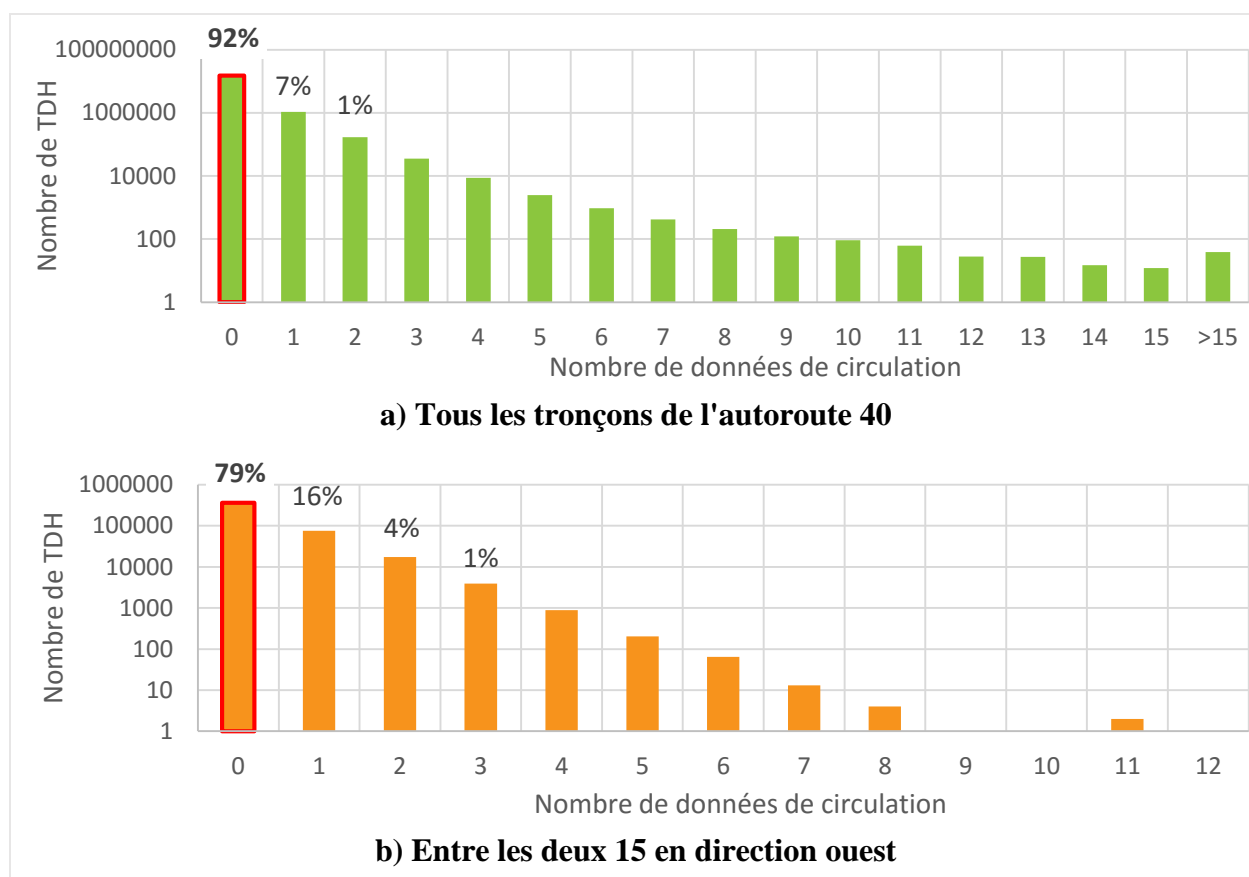


Figure 3-21 : Nombre de tronçon-date-heure (TDH) avec des données de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal de janvier 2012 à septembre 2013

On peut conclure qu'il n'y a pas suffisamment de données pour calculer les indicateurs au niveau du tronçon-date-heure et qu'il faut toujours agréger selon un paramètre de résolution spatial ou temporel.

3.7.3 Algorithme de validation du nombre d'observations

Cette section montre un algorithme pour décider si le nombre de données est insuffisant pour le calcul des indicateurs suite aux sélections spatiotemporelles. La Figure 3-22 présente cet algorithme.

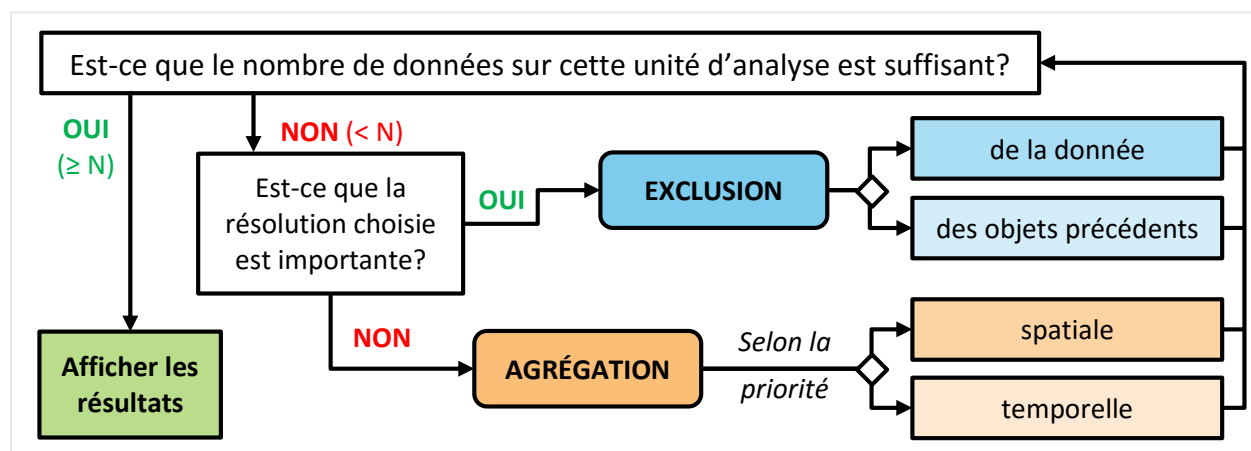


Figure 3-22 : Algorithme décisionnel lorsque le nombre de données est insuffisant

Un critère de validité ou de nombre suffisant d'observations N doit être fixé par l'analyste, selon son niveau de tolérance. La première étape est de vérifier que le nombre d'observations est valide selon le critère fixé. Ensuite, si on tient absolument au niveau de résolution spatiotemporel sélectionné, on peut tout simplement exclure l'objet (tronçon-date-heure) dont le nombre d'observations est trop faible ou tous les objets précédents (pour les tronçons d'extrémité d'un corridor, par exemple). Sinon, on ajuste la résolution en agrégeant celle qui est moins prioritaire. Par exemple, si on s'intéresse absolument à une analyse par heure et que les observations sont insuffisantes pour des tronçons de 100 m, on choisit d'agréger à des tronçons de 200 m. Enfin, on vérifie si cette nouvelle résolution génère un nombre d'observations valide pour chaque unité d'analyse. Une méthode de lissage spatiale est proposée à la section suivante.

3.7.4 Lissage spatial par moyenne mobile

Plusieurs méthodes d'agrégation spatiale existent : combiner tous les tronçons en groupes de tronçons adjacents égaux, combiner seulement les tronçons dont le nombre d'observations est insuffisant avec leurs tronçons adjacents, etc. La méthode utilisée ici est la moyenne mobile (ou moyenne glissante) qui est plutôt une méthode de lissage des données pour éliminer le bruit et imputer des données manquantes. L'avantage est de conserver la résolution initiale tout en ayant un nombre d'observations suffisant pour le calcul des indicateurs. Voici l'équation de la moyenne mobile appliquée à la vitesse moyenne, suivie d'un exemple pour une moyenne mobile effectuant le lissage des tronçons de 100 m sur 500 m :

$$V_{\text{moy}}(t,p) = \frac{1}{N} \sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} V_{\text{moy}}(t+i,p)$$

$$V_{\text{moy}}(t,p) = \frac{1}{5} \sum_{i=-\frac{5-1}{2}=-2}^{\frac{5-1}{2}=2} V_{\text{moy}}(t+i,p) = \frac{1}{5} (\bar{V}_{(t-2,p)} + \bar{V}_{(t-1,p)} + \bar{V}_{(t,p)} + \bar{V}_{(t+1,p)} + \bar{V}_{(t+2,p)})$$

Où : N = nombre de tronçons lissés dans la moyenne mobile

t = tronçon

p = période de temps

Si N est un nombre pair, par exemple pour lisser 100 m en 1 km, (N-1)/2 est arrondi à l'entier. Il est aussi possible d'utiliser une moyenne mobile pondérée qui utilise des coefficients proportionnels à la distance des tronçons adjacents.

3.8 Synthèse

Ce chapitre a répondu au troisième objectif de ce mémoire qui est de développer une méthodologie d'estimation d'indicateurs de la congestion à partir de données de traces GPS. Cette méthodologie comprend le traitement des bases de données de mesure, de réseau et explicatives et la fusion de ces données pour former une base de données qui permet de calculer des indicateurs selon plusieurs objets de visualisation et sélections spatiotemporelles.

Voici la liste des choix méthodologiques et des hypothèses de calcul :

1. La vitesse moyenne des taxis observée à un espace-temps donné est représentative de la vitesse moyenne de tous les véhicules dans la circulation à cet espace-temps;
2. Les points GPS avec une vitesse = 0 km/h et un azimuth = 0 km/h sont exclus;
3. Le territoire de l'enquête origine-destination de 2008 est utilisé;
4. Le réseau « sous-route classifiée » daté du 28 novembre 2013 est utilisé en considérant les autoroutes numérotées de 1 à 99 et de 400 à 999, et les routes principales de 100 à 199;
5. Le réseau routier est segmenté en tronçons égaux de 100 m;
6. La limite de vitesse est codifiée sur les tronçons du réseau à l'aide de *Google Street View*;
7. L'hypothèse de distance maximale est de 12 m pour faire la jointure entre les points GPS et les polygones du réseau routier;
8. L'hypothèse d'angle maximal est de $\pm 15^\circ$ pour associer l'azimut d'un point GPS à l'azimut d'une polygone du réseau routier;
9. L'utilisation d'une seule station météorologique (Ste-Thérèse) est suffisante, puisque les conditions sont considérées uniformes sur l'ensemble du territoire de la région de Montréal;
10. Le seuil d'acceptabilité de la congestion routière est fixée à 60 % de la limite de vitesse;
11. La limite de vitesse est la vitesse de référence pour calculer le retard;

Le prochain chapitre repose sur ces choix méthodologiques pour évaluer la congestion routière selon différentes sélections spatiotemporelles, différents indicateurs et différents objets de visualisation.

CHAPITRE 4 ÉVALUATION D'INDICATEURS DE LA CONGESTION ROUTIÈRE

Dans ce chapitre, la méthodologie présentée au chapitre 3 est appliquée pour évaluer des indicateurs de la congestion routière selon différents objets d'étude et de visualisation pertinents pour le développement d'un outil d'analyse et de suivi de la circulation, ce qui répond au quatrième objectif spécifique de la recherche. Tel que présenté au chapitre précédent, sept indicateurs et quatre objets de visualisation ont été identifiés. Trois objets d'étude (un corridor, un point d'accès et le réseau dans sa totalité) sont proposés ci-dessous afin d'évaluer les indicateurs.

Objet de visualisation	×	Indicateur	×	Objet d'étude
1. Distribution		1. Vitesse moyenne		1. Autoroute 40
2. Courbe cumulée		2. Ratio vitesse		a. Entre le deux 15
3. Grille		3. Temps moyen		b. Pont Ile aux tourtes
4. Carte		4. Temps cumulé		2. Pont Champlain
		5. Retard moyen		a. Autoroute 10
		6. Retard cumulé		3. Réseau complet
		7. % en congestion		

Ce chapitre est divisé en deux parties, soit la description des objets d'étude utilisés et l'évaluation des indicateurs regroupés par objet de visualisation, selon différentes agrégations spatiotemporelles. Il est important de noter que les résultats présentés ne sont pas exhaustifs et sont surtout utilisés pour valider la méthodologie de calcul et la pertinence des indicateurs pour répondre aux objectifs d'un outil d'analyse.

4.1 Objets d'étude

La congestion routière doit être évaluée à plusieurs niveaux et sur différents objets d'étude. Pour les fins de ce mémoire, trois objets d'étude sont utilisés : un corridor, un point d'accès et un réseau complet. Chaque objet d'étude a un contexte, des objectifs et des données propres. Les sous-sections suivantes décrivent les différents paramètres des trois objets étudiés.

4.1.1 Corridor : Autoroute 40 sur l'île de Montréal

Le premier objet d'étude est le corridor. C'est l'objet d'analyse classique qui est souvent utilisé dans la littérature. Le corridor sélectionné est l'autoroute 40 sur l'île de Montréal, qui s'étend sur 53,8 km, du Pont de l'Île-aux-Tourtes à l'ouest au Pont Charles-De Gaulle à l'est. La Figure 4-1 montre l'étendue du corridor étudié. L'autoroute 40 est un corridor majeur à Montréal, qui subit régulièrement une importante congestion; il a d'ailleurs déjà été étudié dans le passé dans le cadre d'un projet de recherche (Loustau et al. 2009). Le corridor de l'autoroute 40 en entier est intéressant comme objet d'étude, car il permet d'avoir une vision globale de la variabilité des conditions de circulation sur une longue distance. Par contre, on s'intéresse aussi à deux segments particuliers du corridor : « entre les deux 15 » et l'approche du Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest.

Le segment « entre les deux 15 » en direction ouest est la portion de l'autoroute 40 (Métropolitaine) située entre l'autoroute 15 nord (Des Laurentides) et l'autoroute 15 sud (Décarie). Cette section de l'autoroute 40 constitue un tronçon de près de 3 km faisant partie d'un itinéraire régulièrement utilisé par les automobilistes qui traversent l'île de Montréal vers le sud en utilisant l'autoroute 15. Ce segment est représenté par une ligne jaune pointillée sur la carte de la Figure 4-1.

Le segment de l'approche du Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest est utilisé pour étudier l'impact de l'ouverture de l'autoroute 30 sur les conditions de circulation sur l'autoroute 40. L'autoroute 30 est une route de contournement sur la rive-sud de Montréal qui a été prolongée vers l'ouest dans le but de « contribuer à décongestionner le réseau autoroutier de la métropole » (Transport Québec, 2013). Ainsi, il est intéressant de vérifier si la congestion routière a diminué suite au parachèvement de l'autoroute 30 qui a été complété le 15 décembre 2012. Étant situé à l'extrémité ouest de l'île de Montréal, juste avant la jonction avec l'autoroute 40, le segment du Pont de l'Île-aux-Tourtes est un excellent endroit pour mesurer la variation des conditions de circulation avant-après l'intervention sur le réseau. La section utilisée s'étend sur 3 km, du milieu du pont jusqu'à l'échangeur du boulevard des Anciens Combattants, afin d'inclure les accès au pont du côté de l'île de Montréal. Ce segment est identifié par la ligne verte à l'extrémité ouest de la Figure 4-1.



Figure 4-1 : Carte de l'étude de cas de l'autoroute 40 à Montréal

Les données utilisées vont du 1^{er} janvier 2012 au 30 septembre 2013, afin d'inclure la date d'ouverture de l'autoroute 30, le 15 décembre 2012. La Figure 3-20 présentée au chapitre précédent décrit l'échantillon disponible.

4.1.2 Point d'accès : Pont Champlain en direction de Montréal

4.1.2.1 Contexte

Dans la littérature, la congestion routière est surtout analysée par corridors. Le corridor routier est défini comme un axe de transport à forte densité de mouvement dans une direction, comme une autoroute, et est un élément important d'un réseau routier. Par contre, comme tout réseau, le réseau routier est composé de liens (corridors ou tronçons) et de nœuds (intersections). C'est d'ailleurs souvent ces nœuds qui sont responsables des embouteillages. C'est à l'endroit des nœuds que les voies de circulation se rencontrent, convergent et souvent fusionnent, ce qui crée des goulots

d'étranglement (demande amont < capacité aval). Une diminution de capacité (offre) pour un même débit (demande) crée des situations de congestion. Les intersections sont donc autant importantes que les corridors.

La problématique des corridors est qu'ils ne considèrent pas l'effet de convergence des multiples chemins d'accès dans la mesure de la congestion. La Figure 4-2 illustre cette problématique en schématisant un échangeur entre deux autoroutes avec un événement source de congestion (!) sur l'autoroute en direction nord. Les véhicules qui empruntent le chemin 1 de l'autoroute A sont évidemment affectés car ils roulent sur l'autoroute en direction nord, donc vers la source de congestion. De plus, il faut s'attendre à ce que les véhicules qui empruntent les chemins 2 et 3 soient aussi affectés par cette congestion. Ainsi, les directions est et ouest de l'autoroute B sont aussi affectés par la congestion. On comprend alors que l'impact de l'événement (!) sur la circulation doit être mesuré sur les approches 1, 2 et 3, grâce au nœud qui les unit sur le réseau, plutôt qu'uniquement sur le chemin 1.

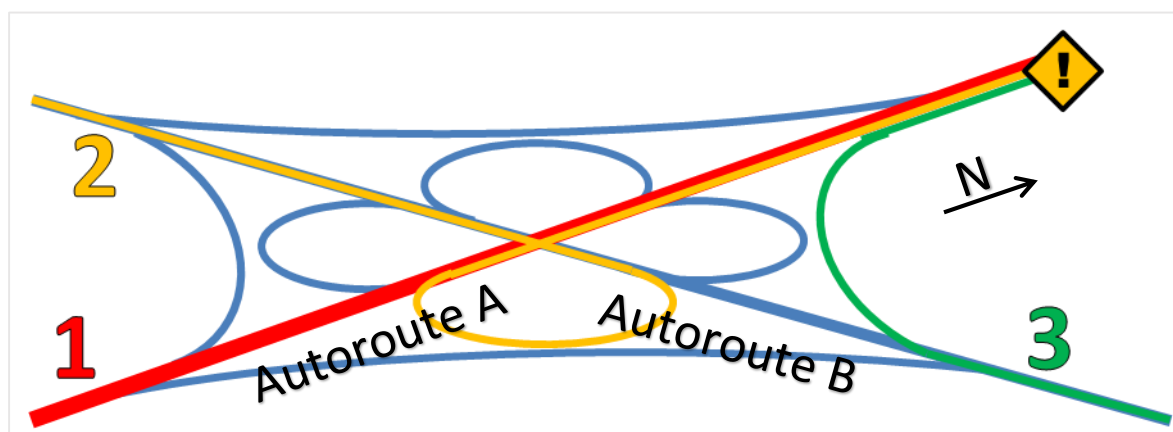


Figure 4-2 : Illustration d'un échangeur avec trois directions d'autoroute impactées par une source de congestion

L'objet d'étude ici est donc le nœud routier, ou plutôt le point d'accès. Il y a deux types de points d'accès : un échangeur d'autoroutes et un pont majeur (Figure 4-3). Les ponts sont un élément important de la circulation dans la grande région de Montréal.



Figure 4-3 : Types de point d'accès : échangeur et pont

4.1.2.2 Description de l'objet d'étude

L'île de Montréal est connectée à ses multiples rives par une vingtaine de pont majeurs qui fonctionnent comme une série d'entonnoirs qui *contrôlent* la circulation, matin et soir; une situation presque unique au monde. Le choix du Pont Champlain pour l'étude de cas est motivé par le fait que c'est le pont le plus utilisé de la région, voire du Canada, et par le fait qu'il soit connecté à trois routes majeures sur la rive-sud de Montréal : l'autoroute 30, la route 134 (boulevard Taschereau) et la route 132 (voir la Figure 4-4). De plus, cette étude permettra d'analyser l'impact global des projets actuels en lien avec le Pont Champlain, soit la construction du nouveau pont et la possibilité d'implantation d'un système léger sur rail (SLR).

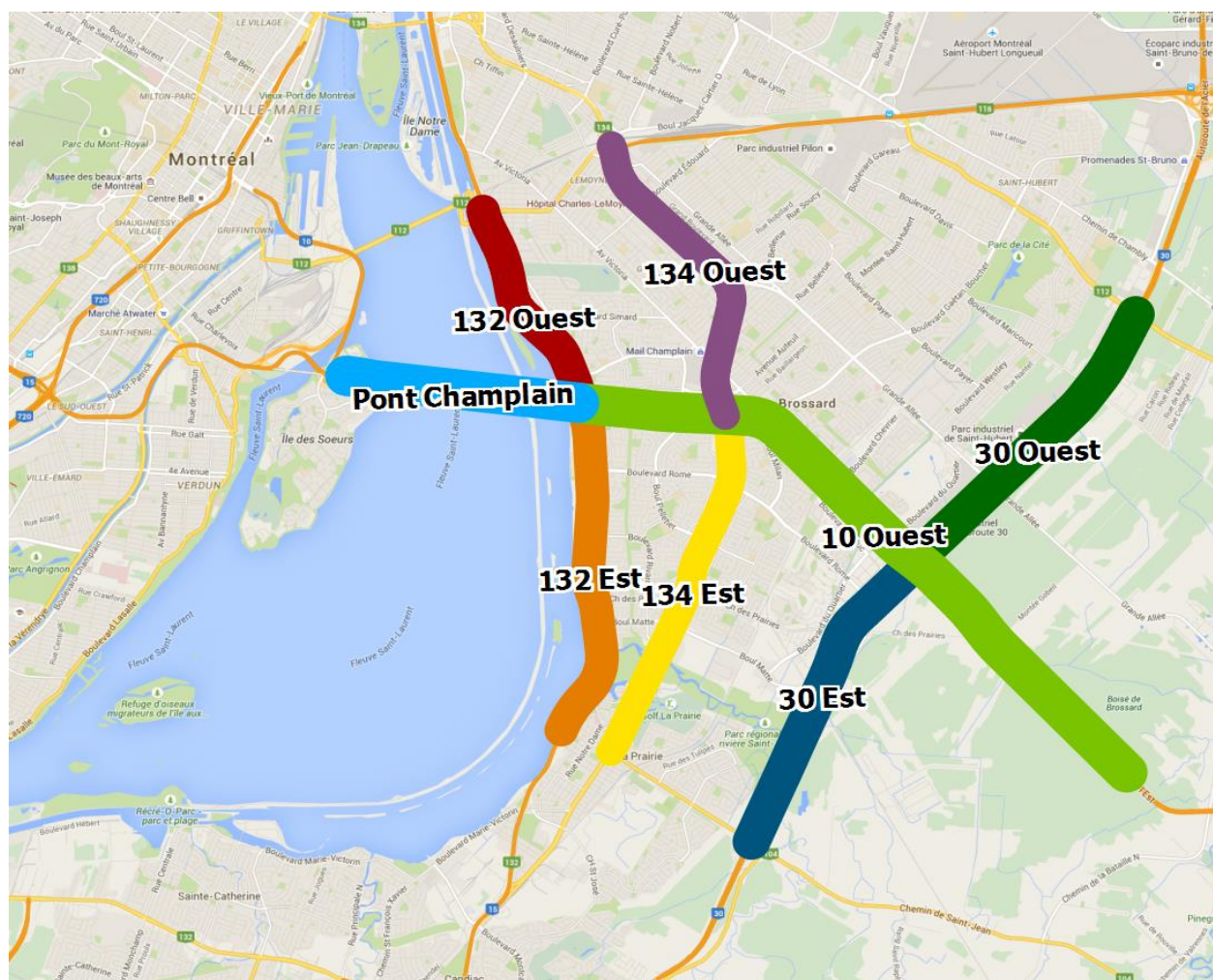


Figure 4-4 : Carte du Pont Champlain et des autoroutes et routes principales connectées

Le réseau routier utilisé est celui décrit au chapitre 3, soit le réseau directionnel du MTQ divisé en tronçons de 100 m. Ici les autoroutes et routes principales qui accèdent (directement ou indirectement) au Pont Champlain vers Montréal ont été sélectionnées, ce qui représente huit corridors routiers :

- | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| 1. Pont Champlain | 3. Autoroute 30 Est | 5. Route 134 Est | 7. Route 132 Est |
| 2. Autoroute 10 Ouest | 4. Autoroute 30 Ouest | 6. Route 134 Ouest | 8. Route 132 Ouest |

Au total, cela représente 45,7 km de route. Point intéressant, tous les corridors sont des corridors est-ouest (à numéro pair), même si ils se croisent à cet endroit. Par contre, il faut considérer le Pont Champlain vers Montréal qui porte trois numéros (10-O, 15-N et 20-O) et le fait que la 132-E est aussi la 15-N tout comme la 132-O est aussi la 20-N. La nomenclature des huit corridors cités plus haut sera utilisée pour la suite.

4.1.2.3 Description de l'échantillon de données utilisées

Les données de circulation utilisées sont toujours les données des centaines de véhicules de la flotte Taxi Diamond qui ont traversé le Pont Champlain vers Montréal (ils ont souvent fait l'aller-retour d'ailleurs). Pour cette étude de cas, on obtient environ 450 points par jour et 15 000 points par mois sur le réseau identifié plus haut. Les données de 2013 et 2014 sont utilisées ici.

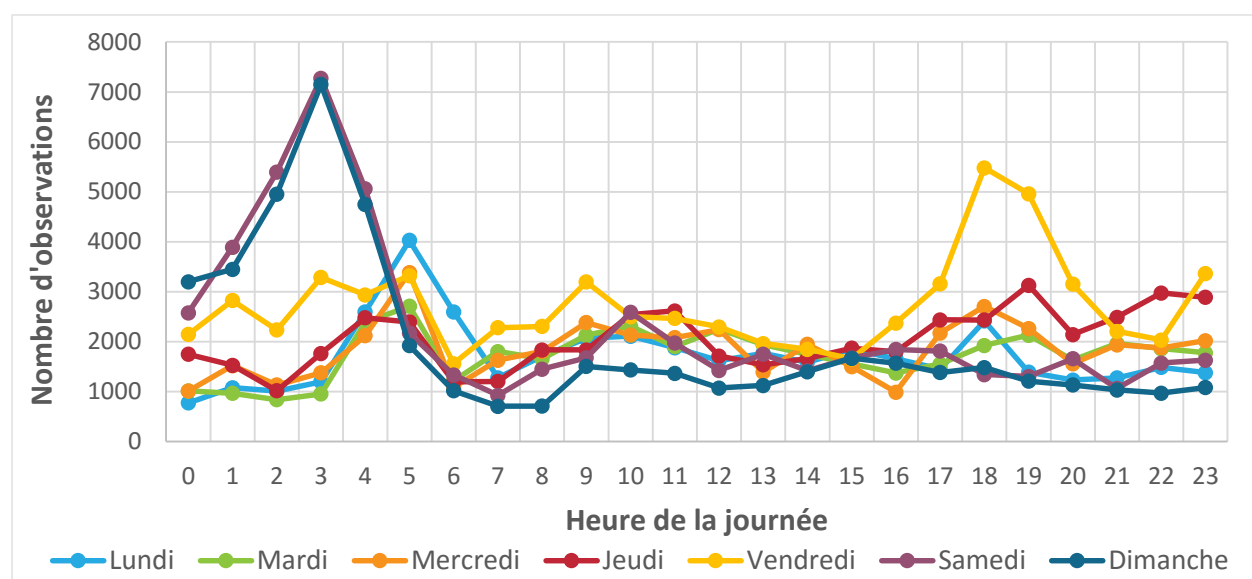


Figure 4-5 : Distribution des données GPS pour l'objet d'étude du Pont Champlain

La Figure 4-5 montre qu'il y a de fortes variations du nombre d'observations dans le temps, spécialement un nombre important de données les samedis et dimanches vers 3h00 du matin. Cela peut correspondre à la fermeture des bars pendant la fin de semaine (aux petites heures le lendemain des vendredis et samedis soirs) où les résidents de la rive-sud de Montréal utilisent le taxi pour retourner chez eux. Il est important de noter que les observations sont uniquement faites lorsque les taxis retournent à Montréal par le Pont Champlain. On remarque aussi une pointe les vendredis vers 18h00, le soir. Il semble aussi y avoir un comportement constant à tous les jours de la semaine, vers 5h00 du matin.

4.1.3 Réseau routier du MTQ de la région de Montréal

Le troisième objet d'étude est le réseau routier du MTQ de la région de Montréal, au grand complet, tel que présenté au chapitre 3, soit les autoroutes et routes principales sur le territoire de l'enquête origine-destination 2008. Le réseau entier est souvent utilisé pour sortir un seul indicateur pour la région métropolitaine au complet, comme le fait l'UMR (Schrack et al. 2012) aux États-Unis. Il

permet aussi de comparer les différents corridors entre eux et de situer dans l'espace les zones de congestion. Par contre, une problématique importante est celle de la disponibilité des données sur l'ensemble du réseau routier sélectionné. La Figure 4-6 montre le nombre d'observations (teinte de rouge) pour tous les tronçons de 100 m ayant au moins 5 observations pour le mois d'octobre 2014. On remarque que l'île de Montréal est très bien représentée, de même que Laval et l'agglomération de Longueuil. Par contre, à l'extérieur de ces trois zones, les données se font plutôt rares et les tronçons sont actuellement négligés.

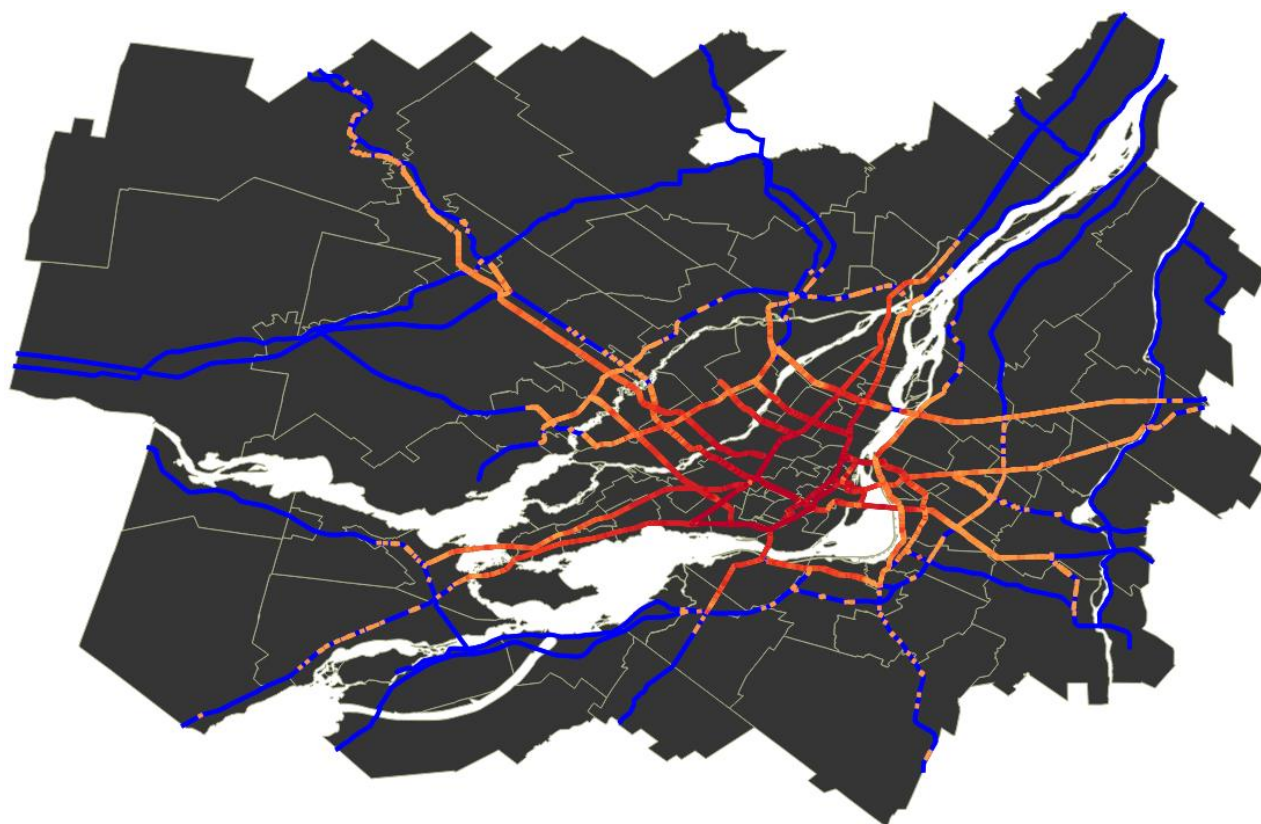


Figure 4-6 : Carte du réseau routier du MTQ de la région de Montréal (bleu) avec la densité d'observations (teinte de rouge) pour le mois d'octobre 2014 (minimum de 5 observations)

Pour cet objet d'étude, les données utilisées sont celles du 7 février 2014 au 6 février 2015, qui est la période d'un an ayant le moins de journées sans données donc la plus complète dans les données disponibles.

4.2 Distribution

La distribution est un objet de visualisation facile à comprendre qui permet d'apprécier la variation des indicateurs pour un corridor ou un segment sur une échelle simple. Cette section montre des résultats pour l'autoroute 40 à Montréal, sur l'ensemble du corridor, sur le segment « entre les deux 15 » et le segment à l'approche du Pont de l'Île-aux-Tourtes pour quitter l'île.

4.2.1 Vitesse moyenne sur l'autoroute 40

Un outil d'analyse doit permettre de visualiser la distribution des vitesses le long d'un corridor. La Figure 4-7 montre différentes agrégation des vitesses sur l'autoroute 40 à Montréal par tronçon de 100 m. On remarque plusieurs endroits où la vitesse moyenne est différente entre la pointe AM et la pointe PM : la vitesse moyenne est plus faible en pointe PM avant et après l'A13 en direction ouest, puis « entre les deux A15 » et à l'est de l'île en direction est. Cette distribution montre également les limites de vitesse (vert) sur le corridor et le seuil de la congestion à 60% de cette limite (rouge). En général, la vitesse moyenne est sous la limite de vitesse en pointe et tombe sous le 60 % à plusieurs endroits.

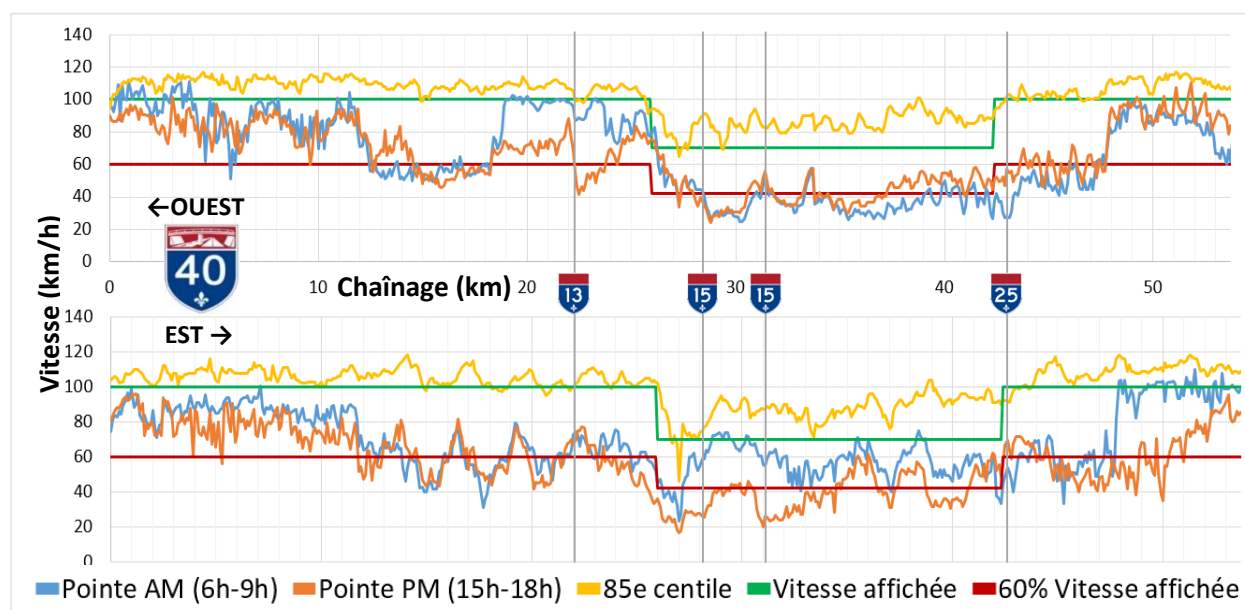


Figure 4-7 : Vitesse moyenne sur l'autoroute 40 par rapport à la limite de vitesse, au seuil de congestion et au 85^e centile des vitesses agrégée par tronçon de 100 m

La courbe jaune représente le 85^e centile des vitesses de la journée, souvent associé à la vitesse en écoulement libre. On remarque que cette vitesse est essentiellement au-dessus de la limite de

vitesse sur l'autoroute 40, allant jusqu'à plus de 30 km/h au-dessus lorsque la limite est de 70 km/h, ce qui confirme que les usagers de la route dépassent cette limite. On remarque également que la distribution des vitesses n'est pas symétrique entre les deux directions.

Cette figure est une représentation typique de l'autoroute 40, soit deux graphiques superposés avec les tronçons de 100 m en direction ouest (en haut) et en direction est (en bas) avec les principales intersections, soit les autoroutes 13, 15 et 25. Cette visualisation peut être appliquée de la même manière aux autres corridors à l'étude.

4.2.2 Temps de parcours moyen sur l'autoroute 40

Les outils de calcul d'itinéraires utilisent souvent une hypothèse pour ajuster les valeurs de temps de parcours pour tenir compte de la congestion. Ces valeurs doivent être calibrées en utilisant des temps de parcours observés. La Figure 4-8 montre la variation du temps de parcours moyen selon le jour de la semaine sur toute la longueur de l'autoroute 40. Cette visualisation permet d'observer le temps de parcours généralement plus élevé entre les autoroutes 15 et 25, surtout en amont de l'autoroute Décarie (sud) en direction est et la différence entre les jours de semaine et de fin de semaine.

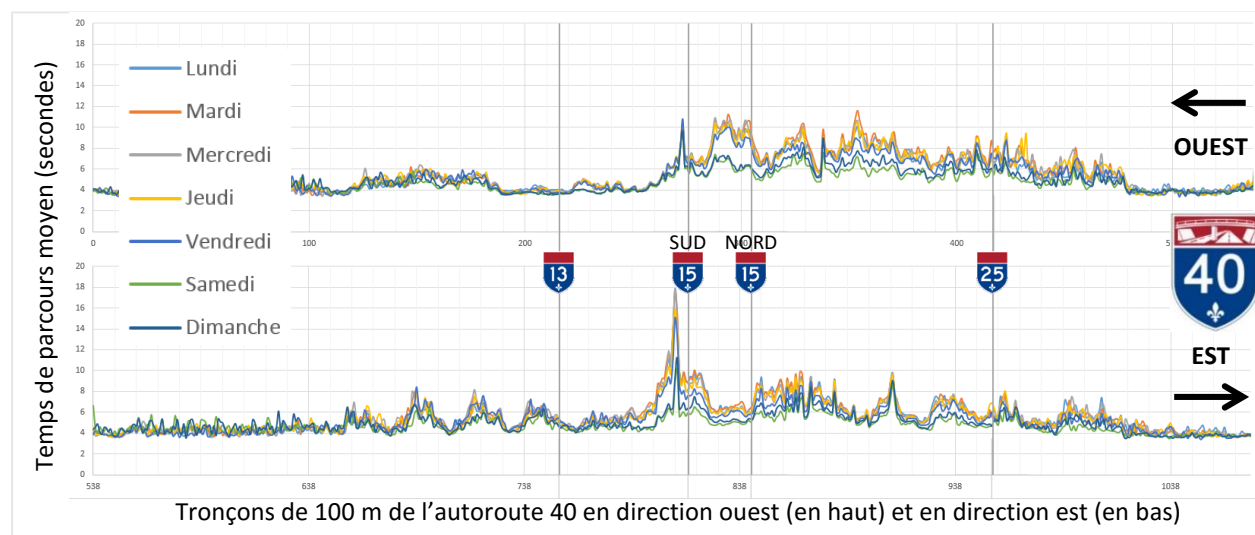


Figure 4-8 : Distribution du temps de parcours moyen sur l'autoroute 40 selon le jour de la semaine

4.2.3 Temps de parcours moyen et cumulé « entre les deux 15 »

La distribution est aussi idéale pour analyser un indicateur sur un segment, tel que le segment « entre les deux 15 » en direction ouest. La Figure 4-9 montre deux distributions, les temps de parcours moyen par tronçon et moyen total pour le segment, selon la période de la journée. À gauche, on peut observer que le temps de parcours entre 18h et 6h est assez stable, soit environ 5 secondes par tronçon de 100 m, ce qui donne un temps de parcours total d'environ 150 secondes ou 2 min 30 s de l'échangeur des Laurentides à l'échangeur Décarie, sur l'histogramme de droite. Sachant que la longueur de ce segment est de 3 km, on retrouve une vitesse de parcours d'environ 70 km/h pour cette période de la journée, ce qui est égal à la limite de vitesse de cette portion de l'autoroute 40.

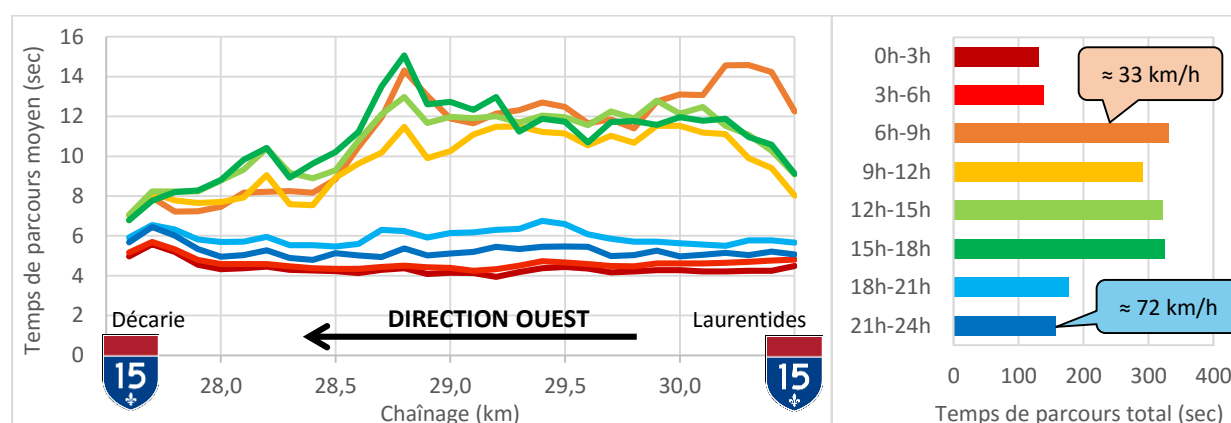


Figure 4-9 : Temps de parcours moyen et cumulé sur l'autoroute 40 « entre les deux 15 » en direction ouest selon la période de la journée

De 6h à 18h, le temps de parcours moyen fluctue sensiblement sur la distance : il atteint un plateau de 12s/100m avant d'atteindre un pic au chaînage 28,8 km (qui correspond à la dernière entrée sur l'autoroute avant l'échangeur Décarie), puis il diminue à l'approche de Décarie. Cela représente un temps de parcours total d'environ 320 secondes ou 5 min 20 s ($\approx 33 \text{ km/h}$) entre les deux 15, donc plus du double du temps de parcours durant la nuit, soit 157 secondes ou 2 min 37 s ($\approx 72 \text{ km/h}$). On peut aussi conclure que la période pendant laquelle les usagers subissent un retard sur ce segment dure pratiquement toute la journée, soit de 6h à 18h.

4.2.4 Vitesse moyenne à l'approche du Pont de l'Île-aux-Tourtes

Un objectif du prolongement de l'autoroute 30 est de réduire la congestion sur le réseau autoroutier de Montréal. L'idée ici est de vérifier si ce but est atteint. La Figure 4-10 fait le suivi de la vitesse moyenne hebdomadaire à l'approche et sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest avant et après l'ouverture de l'autoroute 30 (ligne rouge). La résolution hebdomadaire a été choisie pour pallier le faible nombre d'observations en semaine en période de pointe AM (6h-9h) et PM (15-18h) à cet endroit.

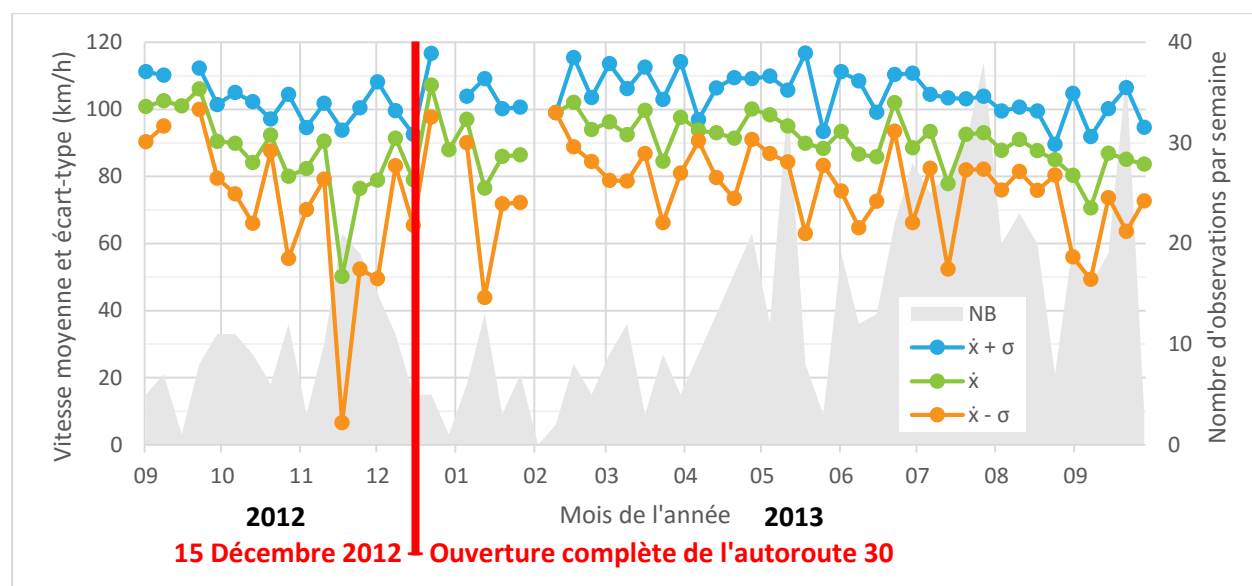


Figure 4-10 : Variation de la vitesse moyenne hebdomadaire, plus ou moins un écart-type, sur le Pont de l'Île-aux-Tourtes en direction ouest en semaine en période de pointe AM et PM

Les données sur une année (septembre 2012 à septembre 2013) montrent que les vitesses hebdomadaires varient considérablement. L'écart-type montre bien la grande variation des vitesses moyennes durant la semaine. Il est possible que certaines variations soient dues à des événements ou incidents à cet endroit. Par contre, avec une seule année de données, il est difficile de se prononcer sur les impacts à long terme de l'ouverture de l'autoroute 30. Il faudrait reculer davantage dans le temps pour observer plusieurs mois similaires (d'années précédentes) et disposer aussi de plus de données sur les mois suivants l'ouverture, notamment les mêmes mois d'observation sachant que la circulation est sujette à différents effets saisonniers et cycliques.

4.3 Courbe cumulée

La courbe cumulée a été créée en réponse au besoin d'analyser un point d'accès à plusieurs corridors comme l'approche du Pont Champlain vers Montréal. Cette section montre les résultats pour cet objet d'étude en termes de temps de parcours cumulé et de retard cumulé.

4.3.1 Temps de parcours cumulé à l'approche du Pont Champlain

Le temps de parcours pour atteindre la fin du Pont Champlain vers Montréal s'additionne sur plusieurs tronçons selon l'itinéraire choisi. Par exemple, si on atteint le Pont Champlain par l'autoroute 30 ouest, puis l'autoroute 10, il faut additionner le temps de parcours sur les trois segments pour obtenir le temps de parcours total. La Figure 4-11 montre cinq courbes cumulées pour chaque heure de 5h00 à 10h00 du matin. De 5h00 à 6h00, la circulation est essentiellement à écoulement libre et le temps de parcours sur chaque segment égale celui effectué en roulant à la limite permise. On peut très bien voir apparaître la congestion à 6h00 sur l'autoroute 10, puis grandir entre le kilomètre 5 et le kilomètre 7 pour se résorber après 9h00. Le temps de parcours sur l'autoroute 30 ouest est également plus grand que la normale de 7h00 à 8h00 et le temps de parcours total pour rejoindre la fin du Pont Champlain atteint 18 minutes à cette heure pour cet itinéraire. L'itinéraire A30 Est – A10 Ouest – Pont Champlain a un temps de parcours moyen de près de 20 minutes de 8h00 à 9h00, soit près du double par rapport à une période sans congestion.

Les temps de parcours moyens varient également selon le jour de la semaine. La Figure 4-12 montre le temps de parcours moyen cumulé total pour traverser tous les tronçons selon le jour. On remarque rapidement que les lundis et vendredis sont les journées les moins congestionnées de la semaine. Ensuite, on constate que le mardi est la journée la plus congestionnée en moyenne, principalement à cause d'un temps de parcours moyen de 37 minutes sur le boulevard Taschereau (134) est. Il est possible que cette valeur élevée soit due à une cause de congestion incidente, comme un accident important ou des travaux à cet endroit. Par contre, c'est impossible à justifier sans avoir l'ensemble des données explicatives. Il est également intéressant de constater que le temps de parcours moyen pour traverser l'autoroute 30 est (16,2 minutes sur 5,2 km = 3,1 min/km) est plus du double de celui pour la route 132 est (8,0 minutes sur 5,4 km = 1,5 min/km) pour une longueur similaire et une limite de vitesse égale (100 km/h).

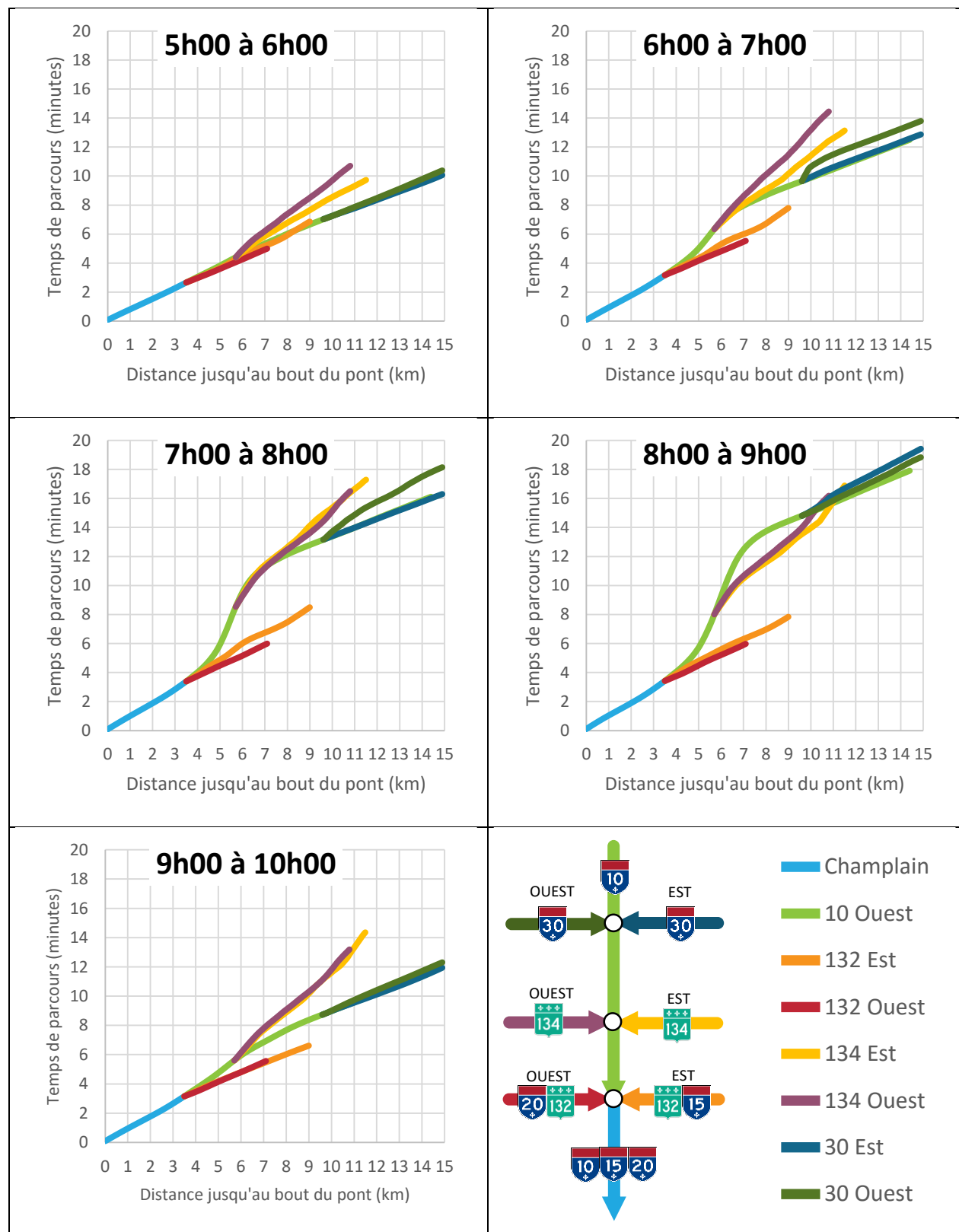


Figure 4-11 : Temps de parcours moyen cumulé pour atteindre la fin du Pont Champlain en semaine

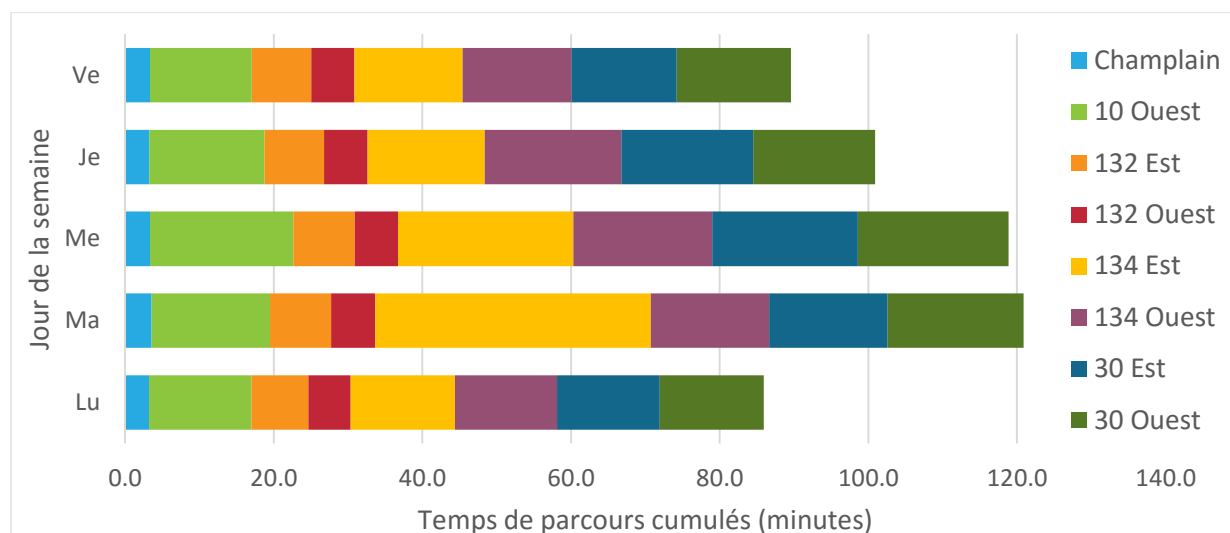


Figure 4-12 : Temps de parcours moyens cumulés des 8 corridors en pointe AM selon le jour de la semaine

4.3.2 Retard cumulé à l'approche du Pont Champlain

Un deuxième indicateur de congestion qui peut être cumulé est le retard moyen, qui est la différence entre le temps de parcours en roulant à la limite permise (le temps de parcours minimum légal) et le temps de parcours mesuré. La Figure 4-13.a) reprend la courbe cumulée de la Figure 4-11.c) avec des lignes pointillées représentant le temps de parcours minimum légal, où on remarque un décalage entre les lignes pleines et pointillées pour chacun des 8 tronçons. Ce décalage sur l'ordonnée par rapport au temps de parcours minimum légal est égal au retard à cet endroit, tel que représenté en-dessous à la Figure 4-13b). On observe premièrement que le retard maximum est de 7,5 minutes, autant sur l'itinéraire utilisant Taschereau (134) que l'autoroute 30 ouest. Le retard cumulé sur le corridor de l'autoroute 10 Ouest est de 5,5 minutes.

Ces valeurs peuvent sembler faibles pour un usager qui s'attend à rouler bien plus vite que la limite de vitesse. L'hypothèse d'utiliser la limite de vitesse pour évaluer le temps de parcours de référence sous-estime le retard pour ces usagers. Par contre, si un retard de 5,5 minutes ne semble pas énorme, il faut considérer son impact total. En supposant un débit de 10 000 véh/h de 7h à 8h en semaine sur l'autoroute 10 et 250 jours de congestion par année, on obtient un retard annuel de 250 000 heures, seulement pour cette heure. Ensuite, en supposant 10 % de véhicules commerciaux avec une valeur du temps 100\$/véhicule-heure et un taux d'occupation de 1,25 personne par véhicule personnel avec une valeur du temps de 20\$/personne-heure (inspirés des valeurs de l'UMR 2012, voir sous-section 2.2.8), on obtient un coût total annuel de 7,4 millions de dollars.

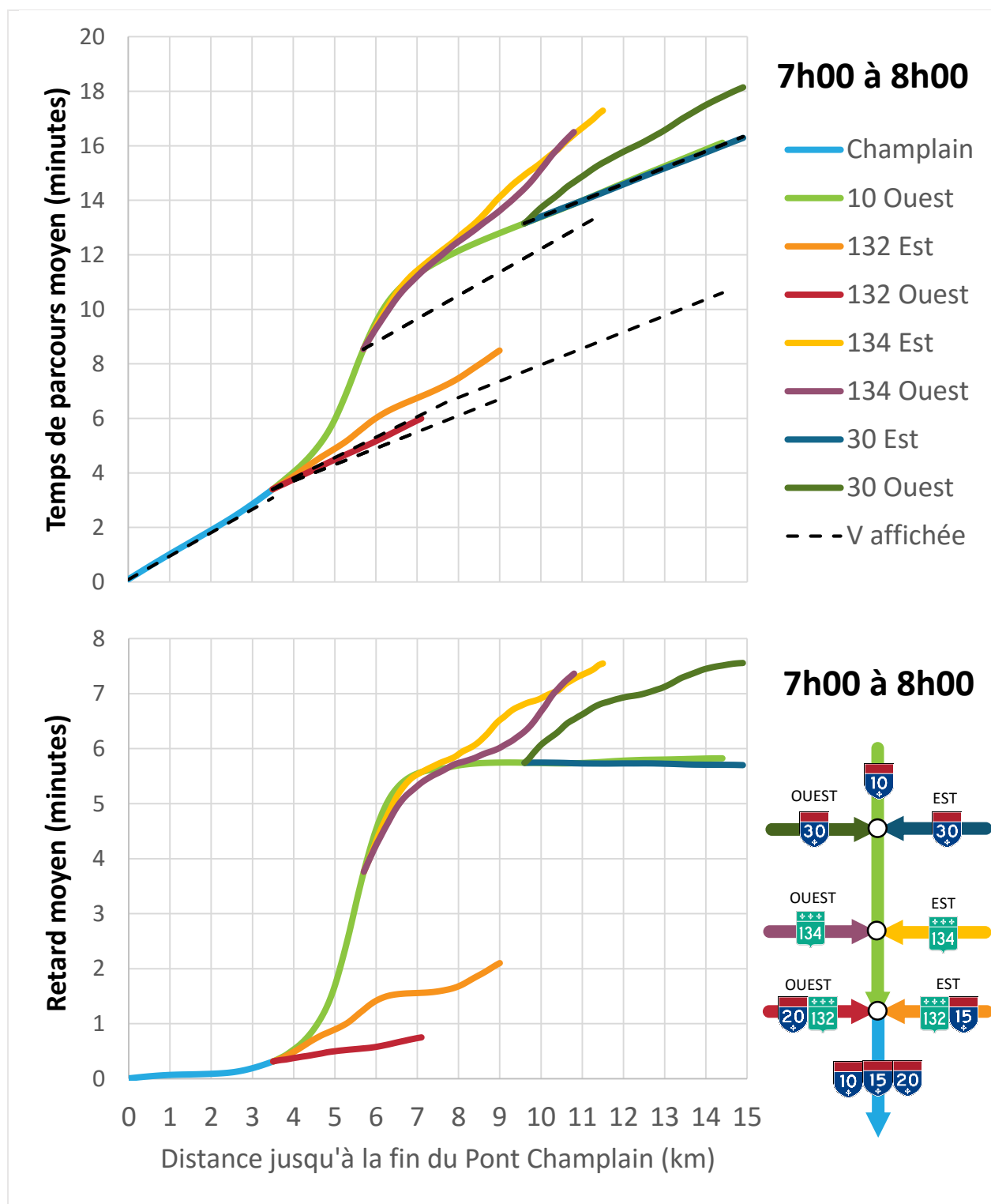


Figure 4-13 : Temps de parcours moyens cumulés (a) et retards moyens cumulés (b) entre 7h00 et 8h00 à l'approche et sur le Pont Champlain vers Montréal

La Figure 4-14 montre la somme des retards moyens cumulés sur tous les corridors pour chaque heure. On remarque tout d'abord que le retard est pratiquement nul à l'extérieur de la période de 6h00 à 9h00. Ensuite, on peut imaginer le coût annuel du retard à l'approche du Pont Champlain en pointe AM. Les valeurs de débit pour chaque tronçon à chaque heure seraient nécessaires pour effectuer ce calcul.

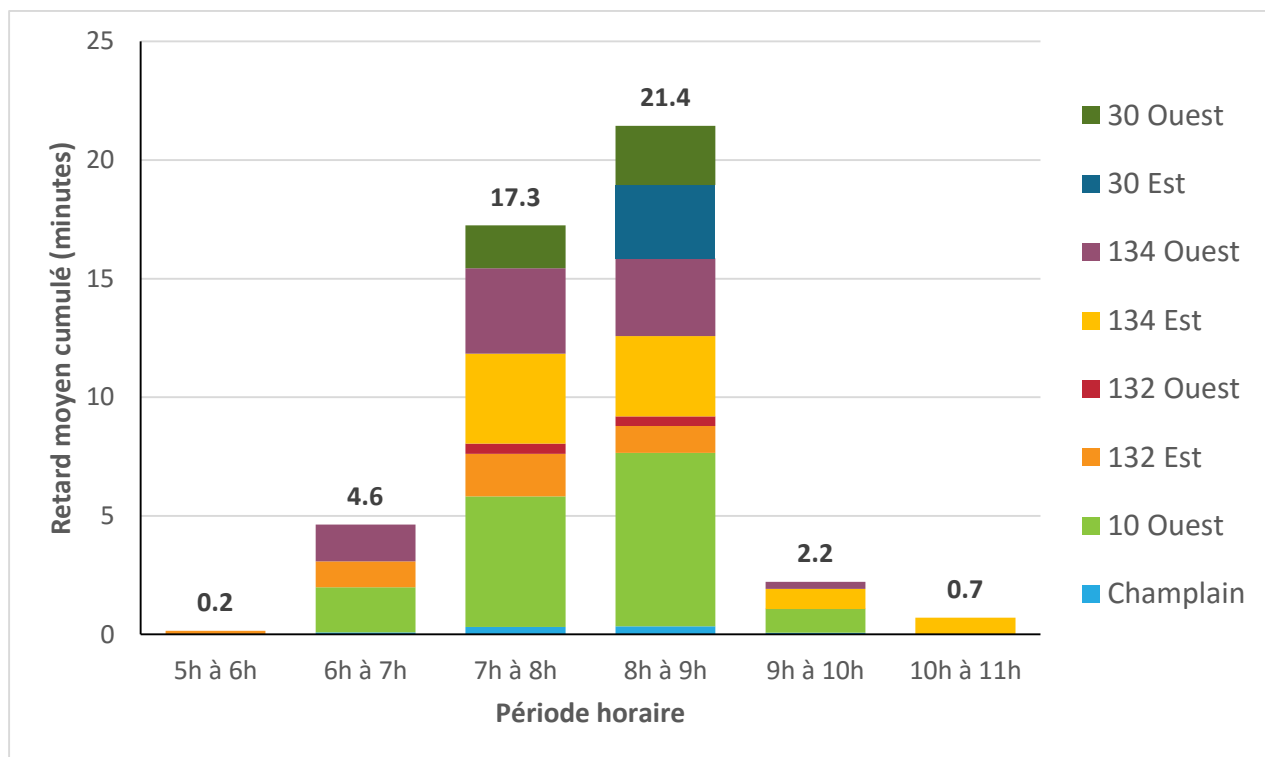


Figure 4-14 : Retard moyen cumulé selon l'heure à l'approche et sur le Pont Champlain vers Montréal en semaine

4.4 Grille de congestion

La grille de congestion est un excellent objet de visualisation pour montrer l'étendue spatiotemporelle de la congestion. Dit simplement, la grille tronçon-heure montre la moyenne de toutes les valeurs d'une base de données de modélisation agrégée par tronçon-heure (ou par tronçon-intervalle de 15 minutes). Cette visualisation permet donc d'avoir une idée de la distribution des valeurs pour fins de modélisation. Cette section montre l'application sur le corridor de l'autoroute 40 et le corridor de l'autoroute 10 à l'approche du Pont Champlain et sur le pont vers Montréal.

4.4.1 Ratio de la limite de vitesse sur l'autoroute 40

Une analyse pertinente est de décrire les conditions de circulation au niveau microscopique. La Figure 4-15 (agrandie à l'Annexe 4) est une grille spatiotemporelle du Ratio de la limite de vitesse (RLV) sur toute la longueur de l'autoroute 40 avec une résolution de 15 minutes \times 100 mètres.

Les tronçons routiers de 100 m sont sur l'axe horizontal dans chaque direction avec les points d'intersection des autres autoroutes. L'axe vertical correspond aux heures de la journée qui progressent vers le bas, dans chacune des directions. Il est important de noter que la limite de vitesse change à deux endroits sur le réseau routier : 70 km/h entre l'autoroute 15 sud (Décarie) et l'autoroute 25 (Louis-H. La Fontaine); 100 km/h pour le reste de l'autoroute. Cela influence évidemment l'indicateur. Voici la légende de couleur pour les trois états de l'indicateur, qui fait référence à la section 3.5.2 de ce document :

- $RLV_{(r,p)} \leq 60\%$ \rightarrow En congestion (rouge)
- $60\% < RLV_{(r,p)} < 100\%$ \rightarrow Circulation intermédiaire (gradation linéaire de rouge à vert)
- $100\% \leq RLV_{(r,p)}$ \rightarrow Circulation fluide (vert)
- *La couleur blanche signifie « aucune donnée disponible ».*

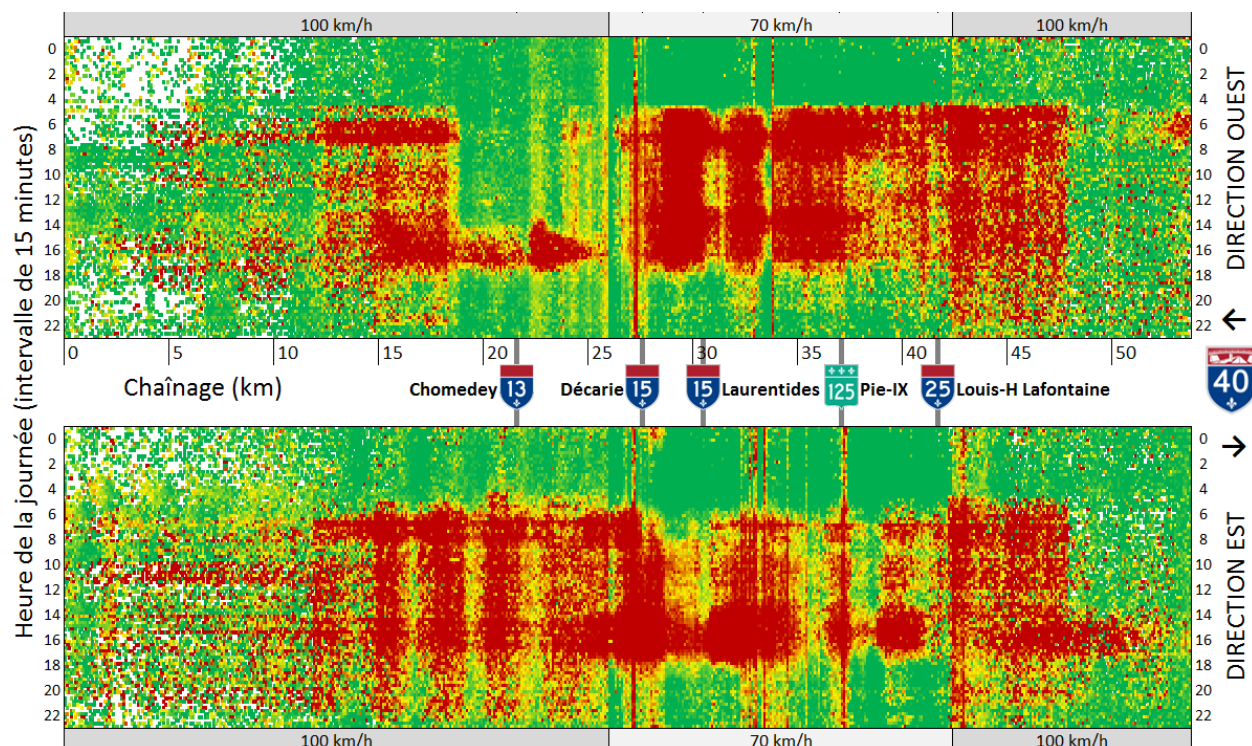


Figure 4-15 : Grille spatiotemporelle du Ratio des vitesses historiques sur l'autoroute 40 de janvier 2012 à septembre 2013

Ainsi, la Figure 4-15 nous montre plusieurs phénomènes de la congestion. Tout d'abord, on peut observer que la congestion commence tôt, assez uniformément vers 5h30, particulièrement à l'est de l'échangeur Décarie en direction ouest. Une zone triangulaire rouge à l'approche de l'autoroute 13 (Chomedey) en direction ouest montre une zone de congestion récurrente à cet endroit durant la pointe PM. Elle correspond à l'apparition d'une file d'attente (la limite entre la congestion et la circulation fluide étant l'onde de choc). D'ailleurs, les données montrent que la congestion récurrente est uniquement présente en après-midi à cet endroit. Dans le cas présenté, l'indicateur est la valeur moyenne calculée sur une année complète, donc les congestions incidentes ne ressortent pas. S'il y avait suffisamment de données pour une journée, il serait également possible de voir apparaître la congestion non-récurrente avec une telle grille appliquée à une seule journée.

Cette visualisation permet aussi de caractériser les patrons de l'heure de pointe sur la longueur de l'A40. On peut observer que son étendue et la durée de la file d'attente varient dans le temps et l'espace, mais on reconnaît que les périodes de pointe se situent *grosso modo* de 6h30 à 10h00 en AM et de 14h30 à 18h30 en PM en direction est. Par contre, on remarque aussi des zones

continuellement congestionnées de 6h00 à 18h00, par exemple « entre les deux 15 » en direction ouest; pour ces tronçons, n'y a donc pas deux heures de pointe mais plutôt une seule période de pointe d'environ 12 heures. L'échelle microscopique des tronçons permet également de localiser les entrées et sorties d'autoroute où les ralentissements sont les plus importants.

4.4.2 Ratio de la limite de vitesse à l'approche du Pont Champlain

La grille de vitesse ne permet malheureusement pas de montrer plusieurs corridors à la fois, du moins pas sur un média à deux dimensions (X,Y), puisque trois dimensions (temps, heure, couleur) sont déjà utilisées. Il faudrait absolument utiliser une représentation en trois dimensions (X,Y,Z) comme une carte en 3D avec le temps en Z et une couleur pour chaque heure pour représenter tous les corridors.

Tout de même, la Figure 4-16 permet d'analyser la congestion sur l'autoroute 10 vers Montréal en tenant compte de la position des autoroutes qu'elle croise. On observe que la congestion débute grossièrement à 6h00 le matin et se termine 3h plus tard. La forme de la zone rouge force à interpréter que la congestion sur l'autoroute 10 débute à l'intersection avec la route 134 et augmente en se rendant jusqu'au début de la zone de 80 km/h, pour une file d'attente maximale d'environ 4 km.

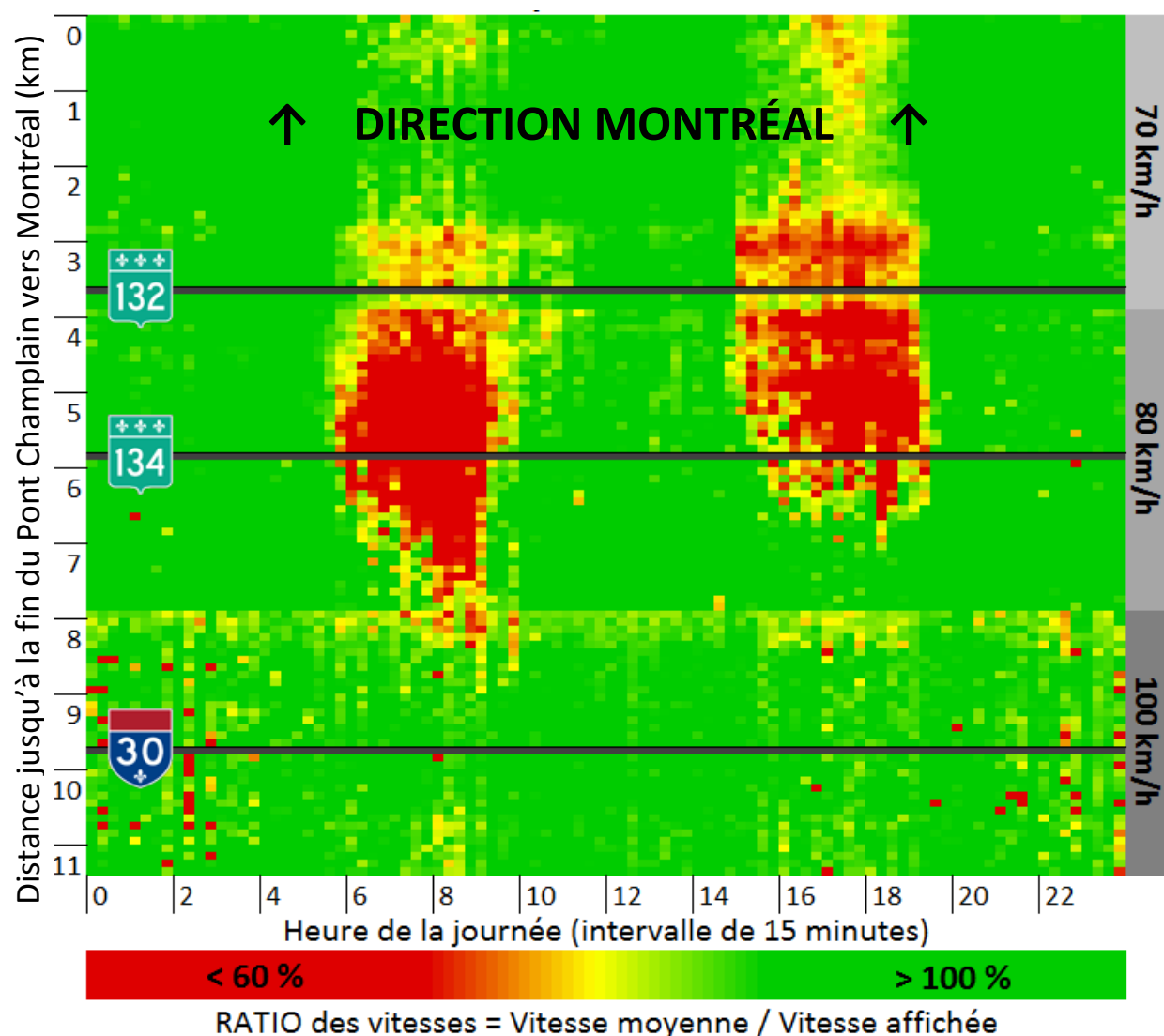


Figure 4-16 : Grille du ratio de la limite de vitesse sur l'autoroute 10 à l'approche et sur le Pont Champlain à vers Montréal en semaine

La congestion à l'approche du Pont Champlain vers Montréal n'est pas seulement présente en heure de pointe AM. Elle est également présente en après-midi grossièrement de 15h00 à 19h00, ce qui est probablement relié au passage de trois voies à deux voies de circulation pour laisser place à une voie réservée au autobus en direction de la rive-sud (de 15h00 à 19h30¹⁵). Il sera intéressant de voir si cette congestion sera toujours présente suite à la construction du prochain pont Champlain qui aura une voie dédiée réservée au transport en commun.

¹⁵ <http://pontchamplainbridge.ca/circuler-au-quotidien/>

4.5 Carte de congestion

La carte est un objet de visualisation de l'étendue spatiale de la congestion routière. Elle est idéale pour tenter de comprendre la situation géospatiale de la congestion à l'aide d'information géographique. Elle permet aussi de facilement visualiser plusieurs corridors à la fois.

4.5.1 Pourcentage en congestion sur l'autoroute 40

Un but important d'un outil d'analyse est de fournir aux décideurs de transport un rapport périodique sur le bilan *de santé* du réseau. L'idée est d'obtenir un indicateur synthétique qui donne un aperçu global du niveau de congestion du réseau. Par exemple, un rapide coup d'œil à la Figure 4-17 permet de voir où se situe la congestion routière sur l'autoroute 40.

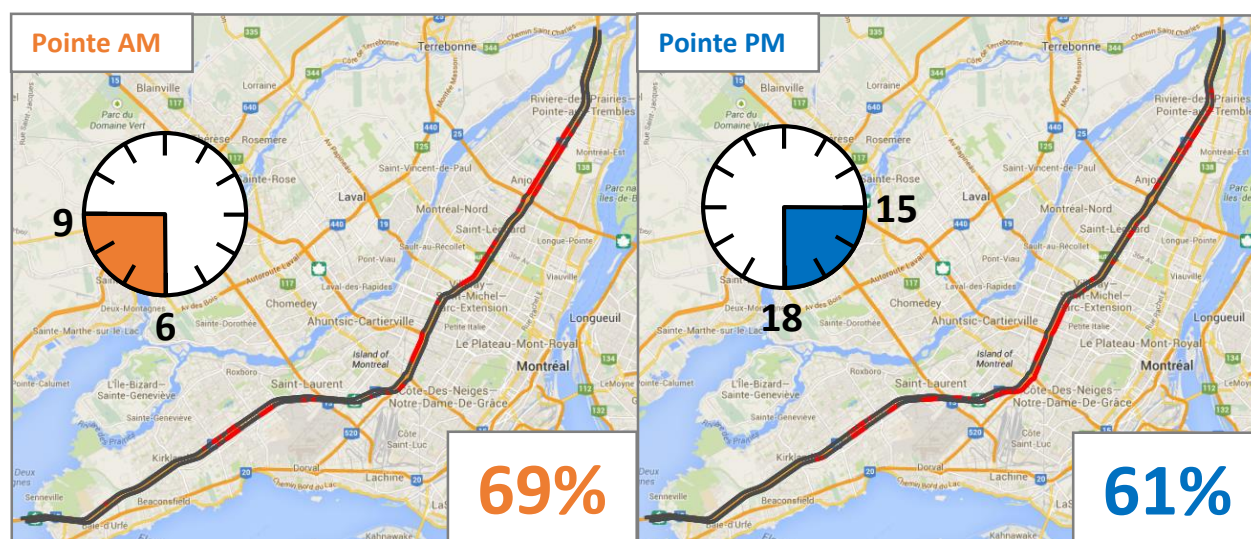


Figure 4-17 : Tronçons de 100m parmi les 15 % plus congestionnés (en rouge) et pourcentage des tronçons congestionnés selon la période de pointe

La Figure 4-17 montre que 69 % de l'autoroute 40 à Montréal est congestionnée en pointe AM et 61 % en pointe PM, selon le seuil de congestion à 60% de la limite de vitesse. Les cartes montrent également en rouge la position du 15^e centile des tronçons les plus critiques selon la période de pointe. Comme on pouvait le constater à la Figure 4-15, la congestion AM est principalement en direction ouest, tandis que la congestion PM est plutôt en direction est.

4.5.2 Vitesse moyenne à l'approche du Pont Champlain

Afin d'ajouter une dimension temporelle à une carte, il est possible de produire une carte animée qui varie dans le temps. La Figure 4-18 montre cinq captures d'écran d'un GIF animé produit pour

l'approche du Pont Champlain vers Montréal à toutes les 15 minutes. On observe tout d'abord que la vitesse moyenne durant la nuit (2h45) se situe près de la limite de vitesse. On remarque que la route 134, qui est un boulevard avec des feux de circulation aux intersections, a une limite de vitesse et mesurée plus faible que les autres corridors. Les cartes suivantes (6h45, 7h30 et 8h00) permettent d'observer que la congestion sur l'autoroute 10 se situe principalement à l'intersection de la route 134 et couvre environ la zone où la limite de vitesse est de 80 km/h, tel qu'observé précédemment à la Figure 4-16. La carte de 8h00 montre également qu'une congestion importante apparaît aux intersections entre les autoroutes 10 et 30 et entre l'autoroute 30 et la route 112.

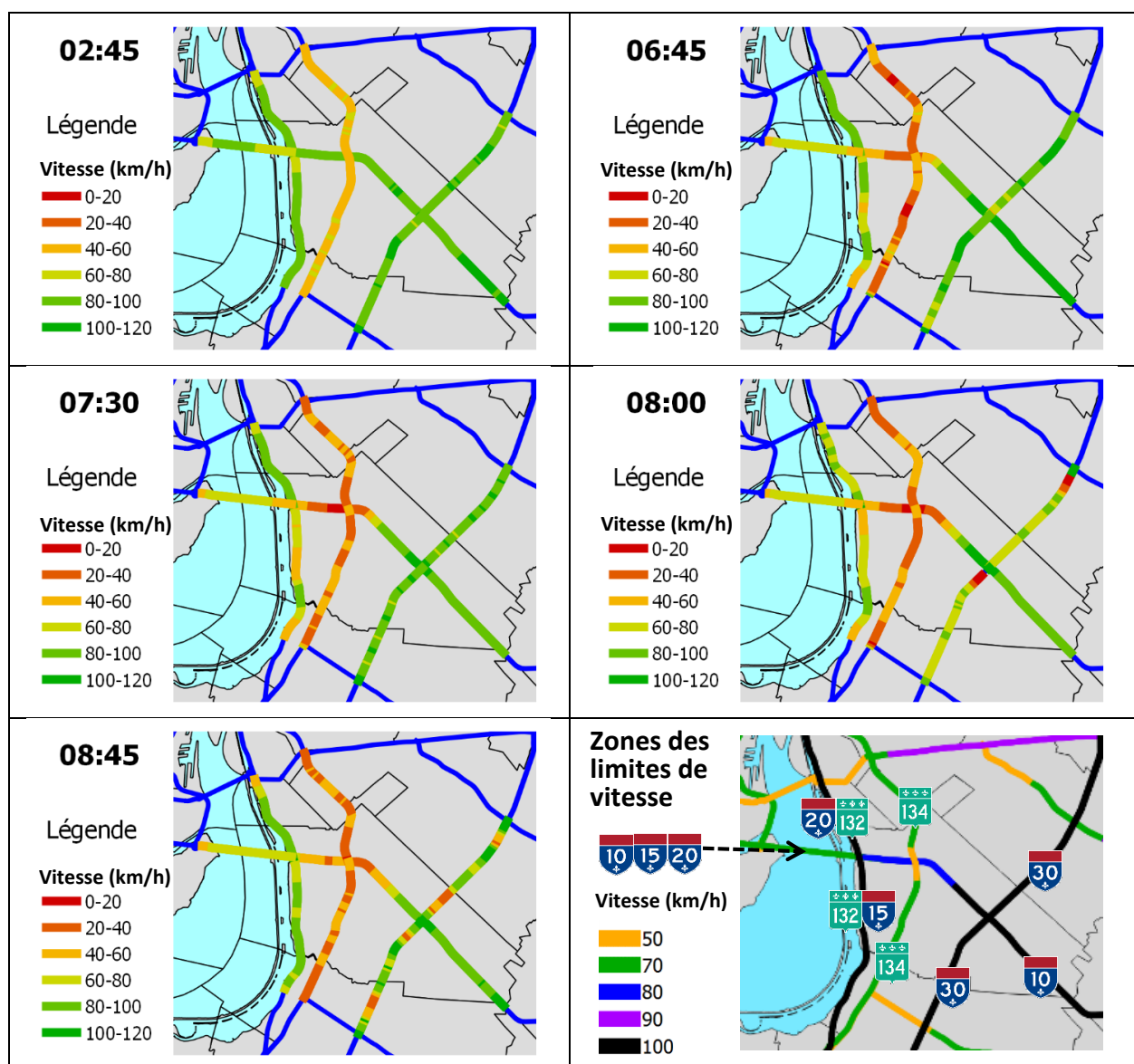


Figure 4-18 : Cartes des vitesses moyennes à l'approche du Pont Champlain vers Montréal selon l'heure en semaine

4.5.3 Ratio des vitesses sur le réseau complet

La carte est le meilleur outil pour avoir une vue d'ensemble des conditions de circulation du réseau routier complet. La Figure 4-19 montre le ratio de la limite de vitesse (RLV) selon trois catégories (congestion, intermédiaire, fluide) et selon la période de pointe en semaine. Afin de s'assurer de montrer des résultats fiables, le critère de cinq observations minimum sur toute l'année a été utilisé. Cette visualisation des conditions de pointe moyenne est riche en information pour un gestionnaire de réseau. Tout d'abord, on peut observer que la congestion sur l'autoroute 15 (Laurentides) en direction sud se forme au croisement de l'autoroute 640 en pointe du matin. On retrouve aussi les mêmes observations faites à la sous-section précédente par rapport au Pont Champlain vers Montréal en pointe AM (même si les échantillons de données sont un peu différents), soit que la congestion se situe principalement dans la zone de 80 km/h sur l'autoroute 10. La congestion PM est parfois très similaire à la congestion AM, par exemple sur la route 138 (Sherbrooke) au centre-ville, et parfois très différente, par exemple sur l'autoroute 15 (Laurentides).

On peut également reconnaître les routes principales par rapport aux autoroutes qui ont des variations de RLV plus prononcées, par exemple la R134 (Taschereau) sur la rive-sud, la R117 (Curé-Labelle) au nord et la R138 (Sherbrooke) à l'est de l'île de Montréal. Évidemment, cela est dû à la présence de dispositifs de contrôle (feux de circulation) sur le lien routier.

Enfin, pour reprendre l'analyse faite à la sous-section 4.5.1, 19,5 % du réseau routier (ayant au minimum cinq observations) en pointe AM est congestionné, par rapport à 20,0 % en pointe PM. Pour le reste, on retrouve respectivement 56,2 % et 60,0 % du réseau dans un état intermédiaire et respectivement 24,3 % et 20,0 % du réseau en écoulement fluide (au-dessus de la limite de vitesse). On peut essentiellement conclure que 80 % de l'ensemble du réseau routier est ralenti en période de pointe et 20 % est sous le seuil de la congestion, en semaine.

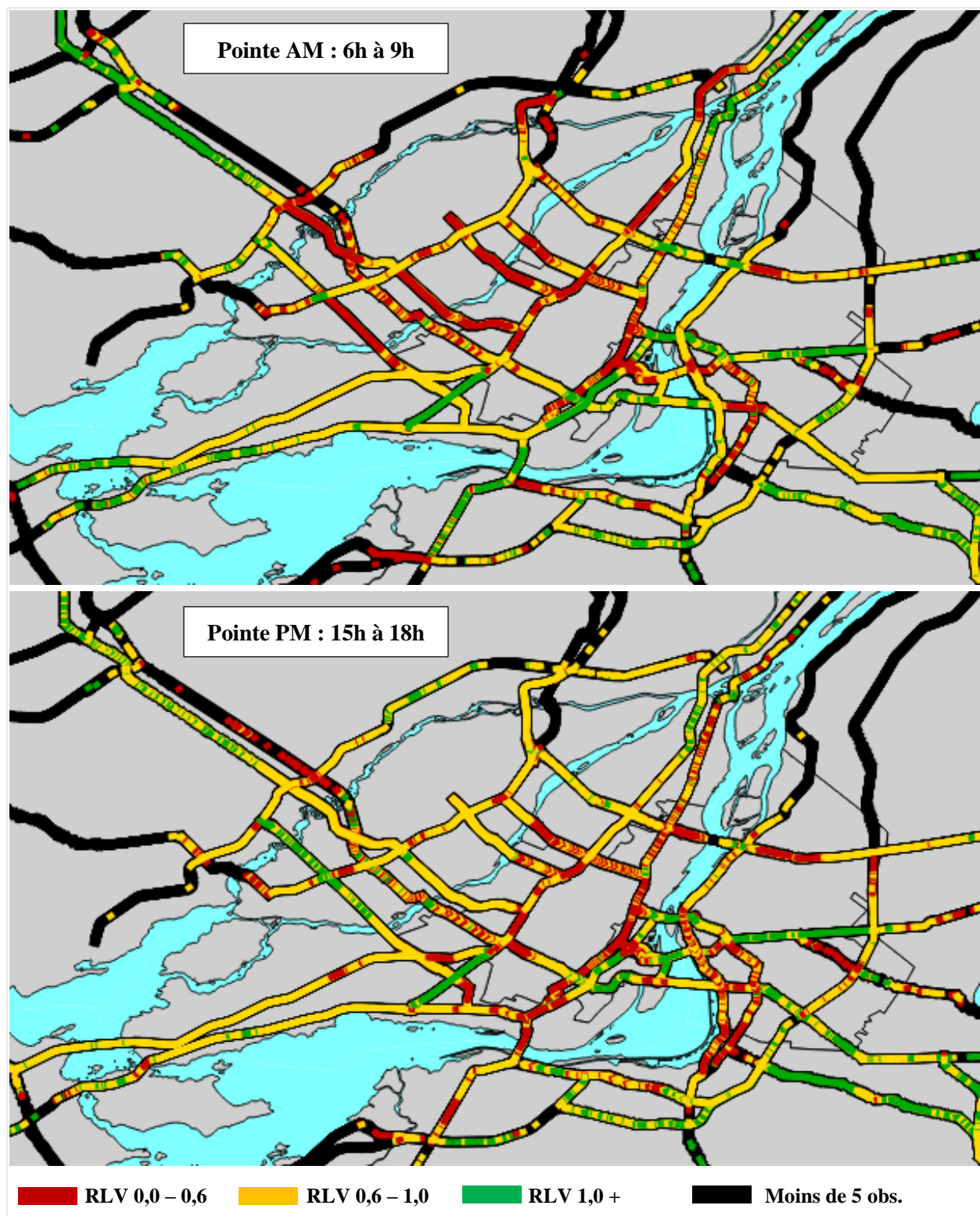


Figure 4-19 : Ratio de la limite de vitesse (RLV) sur l'ensemble du réseau routier en semaine selon la période de pointe, pour les tronçons ayant au moins 5 observations de février 2014 à février 2015

4.6 Synthèse

Ce chapitre a évalué chaque indicateur de la congestion en utilisant un objet de visualisation et un objet d'étude différent. Le Tableau 4-1 suivant résume les différentes visualisations produites.

Tableau 4-1 : Synthèse des objets de visualisation et indicateurs étudiés

Figure	Objet de visualisation	Indicateur	Objet d'étude
Figure 4-7	Distribution	Vitesse moyenne	Autoroute 40
Figure 4-8		TP moyen	
Figure 4-9			« entre les deux 15 »
Figure 4-10		Vitesse moyenne	Pont Île-aux-Tourtes
Figure 4-11	Courbe cumulée	TP moyen cumulé	Pont Champlain en direction de Montréal
Figure 4-12			
Figure 4-13		TP et retard moyens cumulés	
Figure 4-14		Retard moyen cumulé	
Figure 4-15	Grille de congestion	Ratio des vitesses	Autoroute 40
Figure 4-16		Ratio des vitesses	Pont Champlain (A10)
Figure 4-17	Carte de congestion	% en congestion	Autoroute 40
Figure 4-18		Vitesse moyenne	Pont Champlain
Figure 4-19		Ratio des vitesses	Réseau complet

Cela permet d'illustrer et valider que la méthodologie de développement d'indicateurs présentée au chapitre 3 fonctionne pour produire des indicateurs d'analyse de la congestion. On peut également conclure que les indicateurs et les objets de visualisation choisis sont adéquats pour faire l'analyse et le suivi des conditions de circulation pour un objet d'étude (corridor, segment, accès et réseau) et une sélection spatiotemporelle donnés. Chaque visualisation présentée est riche en analyse et devrait faire partie d'un outil d'analyse de la congestion routière.

CHAPITRE 5 MODÉLISATION DE L'IMPACT DES CONDITIONS MÉTÉOROUTIÈRES

Réduire la congestion routière demande le développement de stratégies de gestion de la circulation efficaces. Pour ce faire, la première étape est de mesurer la congestion à l'aide d'indicateurs d'analyse et de suivi, tel que réalisé au chapitre précédent. L'étape suivante est d'identifier les causes de la congestion, ce qui est essentiel pour déterminer les stratégies appropriées. Tel que vu précédemment, la clé est de se concentrer sur les stratégies qui améliorent l'opération des infrastructures existantes en gérant rapidement les sources de congestion incidentes (Cambridge Systematics, 2005). Dans ce chapitre, on s'intéresse donc à déterminer les facteurs responsables des fluctuations de la congestion. De nombreux événements et circonstances peuvent affecter les conditions de circulation de manière imprévisible : la météo, les travaux routiers, les incidents de la route et d'autres événements spéciaux. La météo est une cause de congestion très importante, surtout pour une ville nordique comme Montréal, où les conditions hivernales durent de quatre à six mois chaque année. Sans oublier que la congestion est aussi créée simplement par le fait qu'à certaines heures, la demande dépasse la capacité, créant une congestion récurrente.

Ce chapitre propose le développement d'un modèle probabiliste de l'occurrence des événements de congestion et de l'influence de différents facteurs sur le niveau de congestion. Tout d'abord, des éléments de contexte sont présentés afin de justifier cette étude. Ensuite, une section décrit les données utilisées pour ce chapitre, suivie de la méthodologie de montage de la base de données de modélisation avec les variables binaires spatiales, temporelles et météorologiques. Puis, la formulation des modèles est explicitée avant l'analyse des résultats obtenus grâce à ces modèles. Le chapitre se conclut par une synthèse des résultats.

5.1 Contexte

5.1.1 Estimation de modèle dans un outil automatisé

Un objectif connexe à l'analyse de l'impact des conditions météorologiques est de développer une méthodologie d'analyse croisée des données à l'aide de modèles explicatifs. Le schéma de la Figure 5-1 expose les différentes composantes du module d'analyse. D'un côté, le module d'analyse

croisée de l'outil d'analyse de la congestion effectue une sélection des données à modéliser, puis une sélection d'un modèle à évaluer au sein de modèles pré-formulés. La requête de données est d'abord envoyée au serveur PostgreSQL qui organise une base de données de modélisation, qu'il fournit par la suite au logiciel libre d'analyse statistique R. R va ensuite générer le modèle sélectionné avec la base de données de modélisation reçue et produire les statistiques classiques (coefficients, erreur, z value, $\Pr(>|z|)$, OR) décrivant le modèle. Ces résultats statistiques sont finalement retournés à l'utilisateur qui peut ensuite générer d'autres modèles au besoin.

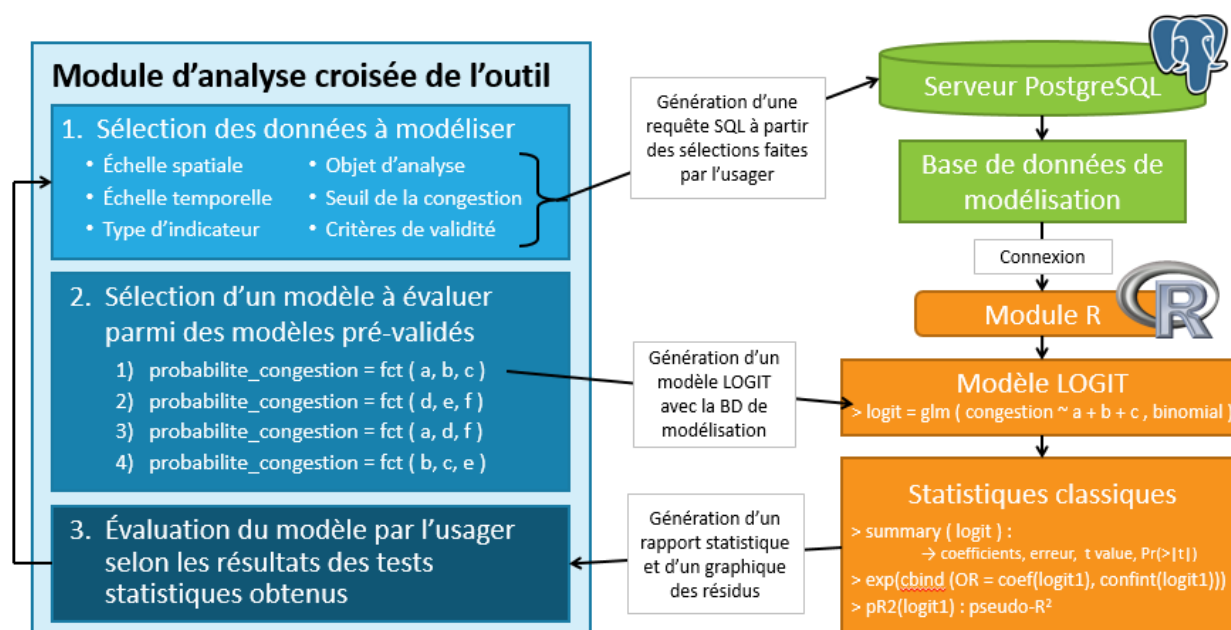


Figure 5-1 : Schématisation de la génération automatisée de modèles explicatifs

5.1.2 Motivation

La littérature regroupe plusieurs études de cas sur les causes de la congestion. L'effet des conditions météorologiques (température, vitesse du vent, visibilité, état de la chaussée et des taux de précipitation) sur les conditions de circulation (vitesse, volume, capacité, temps de parcours et fiabilité) a été largement étudié en utilisant des régressions linéaires, des régressions logistiques et d'autres analyses statistiques. Par exemple, le Chapitre 10 du HCM 2010 présente des « résultats complets » concernant la réduction de la capacité d'une autoroute en raison de la pluie, la neige, la température, le vent et la visibilité (TRB, 2010). Ces résultats sont obtenus d'une recherche menée par Agarwal et al. (2005) sur les autoroutes de Minneapolis qui utilise les données d'environ 4000 détecteurs de circulation et de trois stations météorologiques sur quatre ans. L'étude propose des

valeurs de réduction de capacité pour différentes intensités de précipitation (par exemple pluie faible, pluie modérée et forte pluie) et montre que le HCM 2000 pourrait sous-estimer ou surestimer certaines valeurs de réduction de la vitesse et de la capacité.

Chaque étude consultée a obtenu des résultats utiles pour un cas d'étude géographique spécifique, et il est évident que ces résultats ne peuvent pas être simplement transposés à d'autres contextes. Ainsi, chaque étude supplémentaire peut aider en confirmant ou infirmant certaines conclusions. L'objectif de l'étude de cas présentée dans ce chapitre est donc de décrire l'effet des conditions météorologiques sur la congestion à Montréal.

5.2 Description de l'étude de cas

Pour cette étude de cas, les données de circulation du 7 février au 31 mars 2014 sont utilisées pour étudier les conditions hivernales entre février et mars. De plus, seulement les données des jours de semaine sont utilisées pour ce premier modèle puisque la distribution des données de fin de semaine représente un phénomène totalement différent (Figure 5-2).

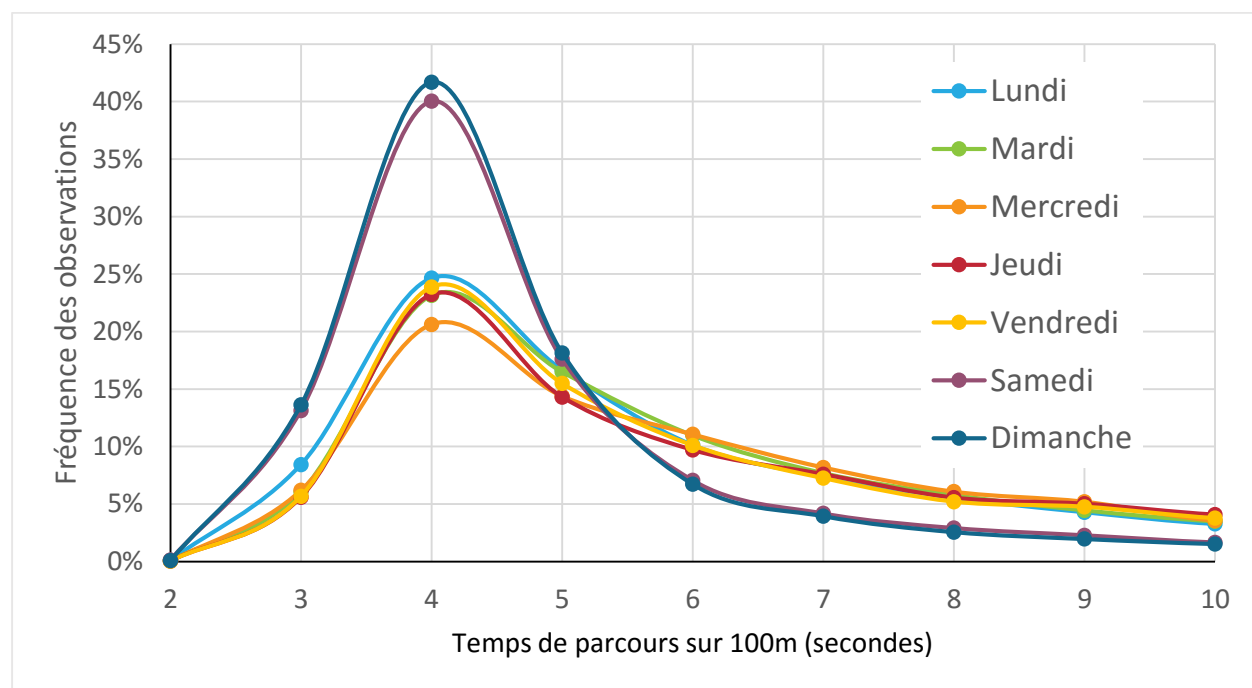


Figure 5-2 : Distribution fréquentielle du temps de parcours selon le jour de la semaine pour le réseau complet du MTQ en février 2014

Ensuite, seulement les autoroutes de la région métropolitaine de Montréal sont utilisées. Les routes principales ont été ignorées parce qu'elles ont des intersections contrôlées par des feux de

signalisation et le phénomène de congestion est différent. La Figure 5-3 montre l'étendue spatiale de l'étude de cas. Peu de recherches ont étudié l'impact de la météo au niveau d'un réseau entier d'une région métropolitaine. La région est également divisée en utilisant les huit régions habituelles de l'enquête origine-destination.

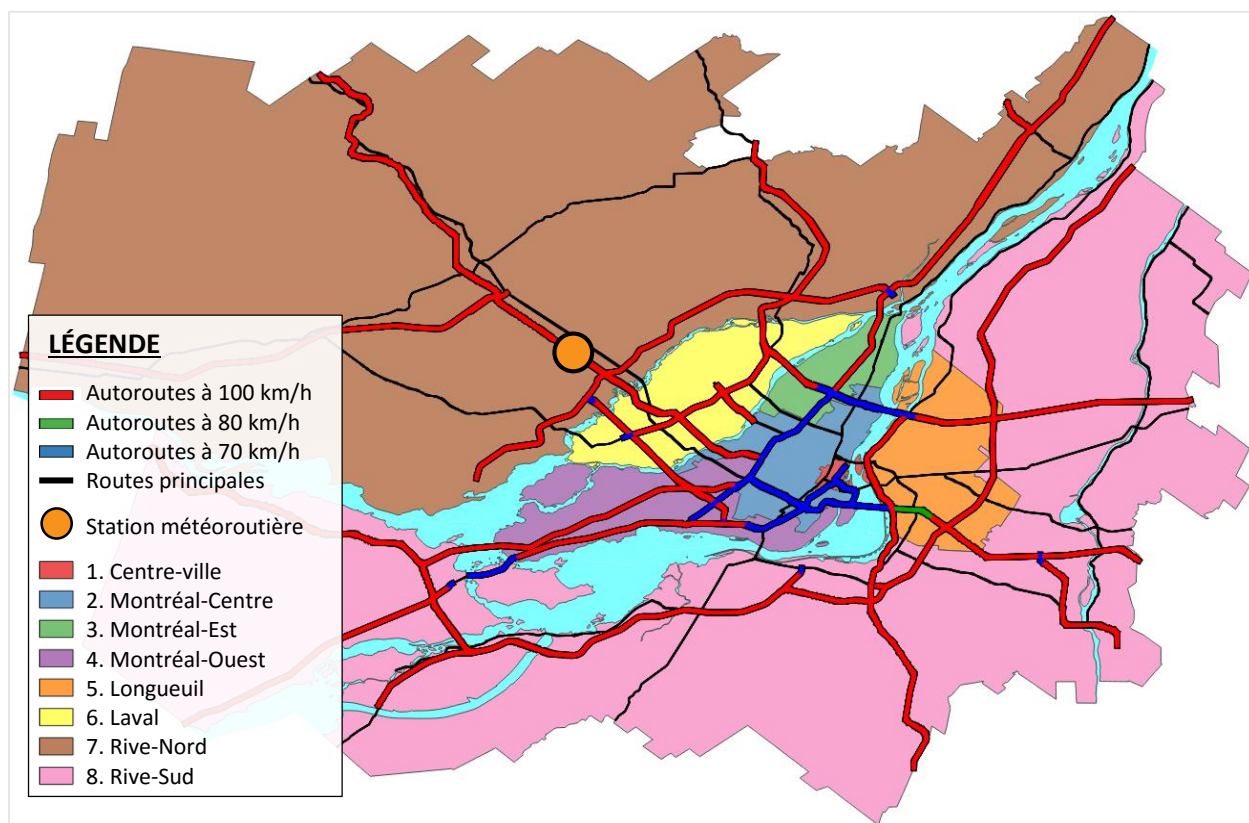


Figure 5-3 : Carte de l'étude de cas : Autoroutes de la région de Montréal (8 régions) avec leur limite de vitesse et la localisation de la station météorologique Ste-Thérèse du MTQ

Finalement, seulement trois variables de la base de données météorologiques ont été sélectionnées, soit l'état de la chaussée, le type de précipitation et la visibilité. D'abord, l'état de la chaussée est un code dérivé de plusieurs mesures sur la chaussée et est classé en six catégories : sec, humide, mouillé, glacé, sel résiduel et glissant. Ensuite, le type de précipitation provient des codes 4680 normalisés par la World Meteorological Organization (WMO) qui ont été simplifiés en six codes de précipitation : aucune, poussière, brouillard, bruine, pluie et neige. Enfin, la visibilité est mesurée en utilisant un capteur spécial avec une distance de visibilité maximale de 3,1 km, qui est considéré comme une bonne visibilité. Les distances plus faibles signifient une visibilité réduite.

5.3 Définition du modèle

De nombreux types de modèles peuvent être utilisés pour modéliser l'impact des conditions météorologiques sur la circulation, qui est représentée ici par le ratio de la limite de vitesse. Plusieurs modèles linéaires ont été expérimentés pour tenter de décrire cet impact sans obtenir de bons résultats.

En regardant les distributions fréquentielles du ratio de la limite de vitesse (RLV) à la Figure 5-4, on constate l'existence de deux principales conditions de circulation représentées par deux pics distincts : le plus grand vers $RLV = 1,0$ et le plus bas près de $RLV = 0,2$. Le premier fait référence aux conditions de circulation normales et le second représente les conditions congestionnées. L'idée est donc de simplifier le modèle en considérant deux états : congestionné ou non.

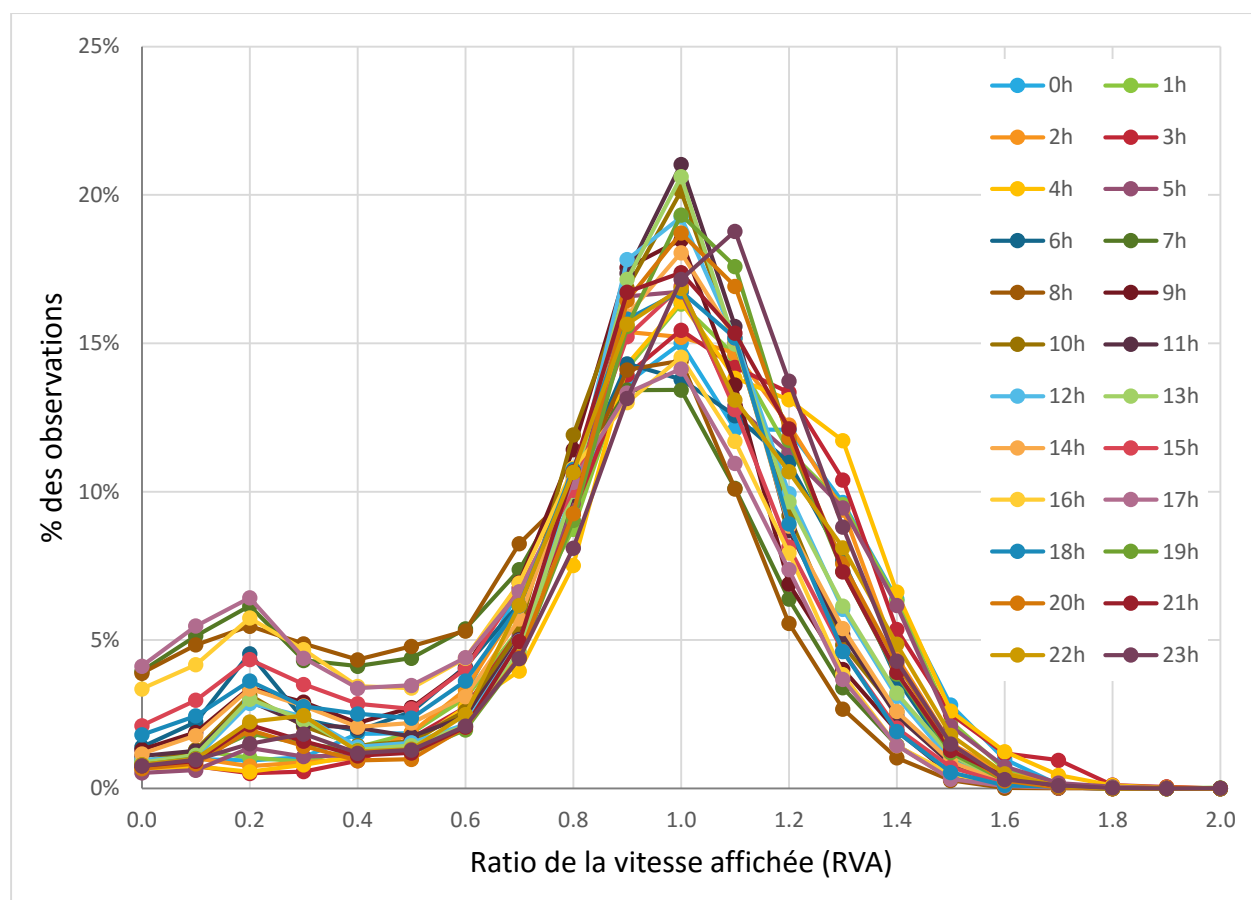


Figure 5-4 : Distribution fréquentielle du ratio de la limite de vitesse (RLV) sur tout le réseau pour février 2014

Par conséquent, le modèle de régression logistique (LOGIT) a été choisi pour cette étude, car il modélise la probabilité qu'un événement se produise par rapport à un autre, c'est-à-dire, dans le cas présent, que les conditions de circulation soient encombrées (congestion = 1) ou non (congestion = 0), où la congestion est représentée par le RLV. Ainsi, les variables spatio-temporelles et météorologiques décrivent la probabilité que les conditions soient congestionnées, selon le seuil de congestion prédéfini.

Le modèle LOGIT peut être écrit de cette façon :

$$\text{LOGIT(RLV < seuil de congestion)} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Période horaire} + \beta_2 \text{ Région} + \beta_3 \text{ Chaussée glacée} + \beta_4 \text{ Chute de neige} + \beta_5 \text{ Bonne visibilité}$$

5.4 Montage de la base de données de modélisation

Trois types de variables binaires sont générés à partir de la base de données de modélisation pour estimer les modèles logistiques : la période horaire, la région et les attributs météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). La Figure 5-9 montre les distributions du ratio de la limite de vitesse (RLV) pour chacune des variables indépendantes explicatives du modèle exposé à la fin de cette section.

5.4.1 Création des périodes horaires

Puisque la congestion a des variations temporelles quotidiennes, il est important de considérer le moment de la journée dans le modèle. Plusieurs heures consécutives peuvent être regroupées lorsque les conditions de circulation sont similaires durant ces heures pour générer des périodes horaires. Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS) est utilisé pour déterminer les heures qui peuvent être regroupées en regardant leurs distributions fréquentielles. Le test de KS est un test statistique non-paramétrique qui compare les fonctions de distribution cumulative (FDC) issues de deux distributions ou échantillons : l'hypothèse nulle est que ces distributions sont tirées de la même loi. Le résultat statistique généré par le test est la plus grande distance D entre les FDC. La Figure 5-5 illustre un exemple de résultats du test de KS comparant les distributions de 6h et 7h pour tous les tronçons en mars 2014. La plus grande distance D entre les deux courbes est de 15,9%, ce qui est assez élevé et signifie que les deux distributions ne sont pas similaires.

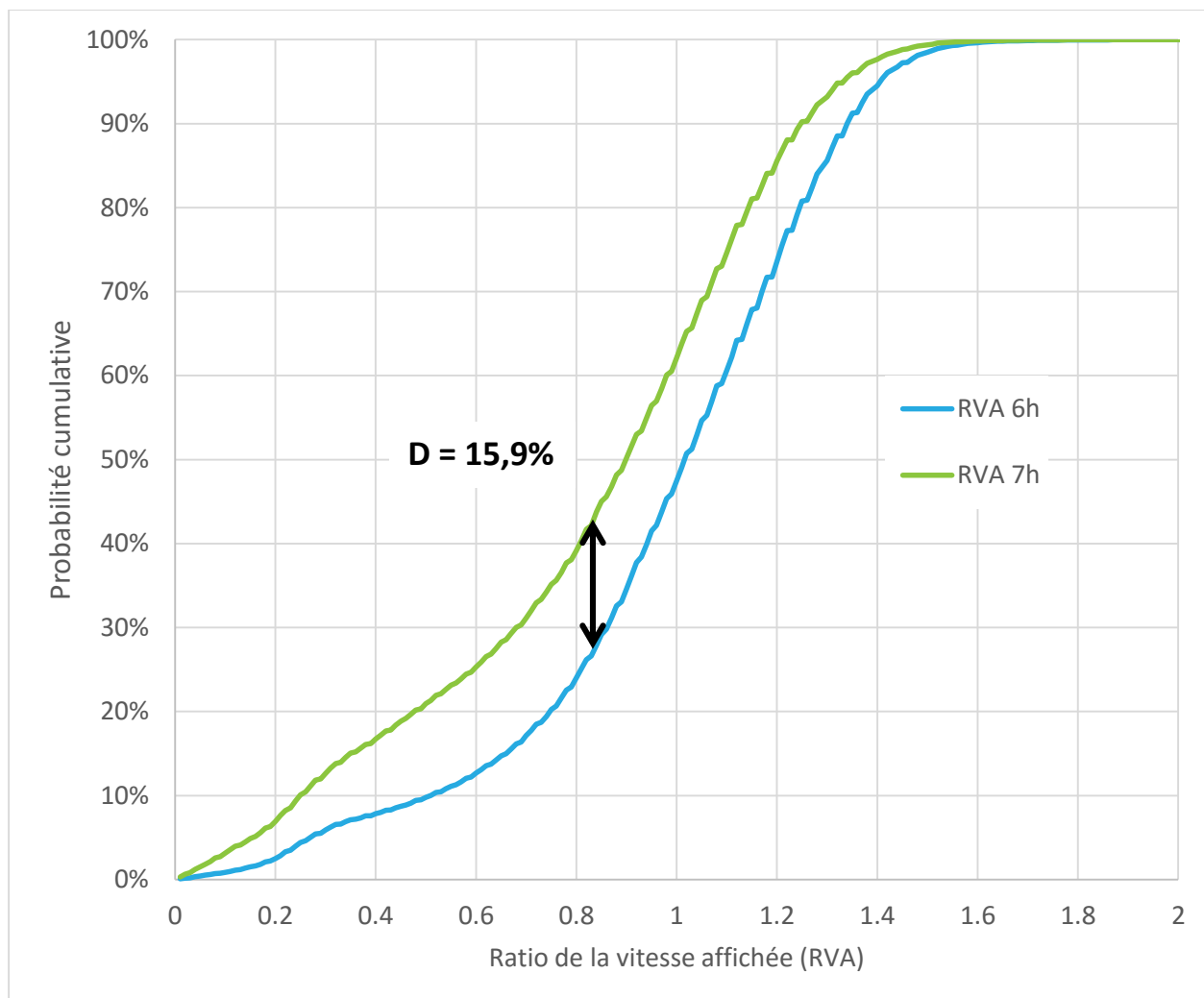


Figure 5-5 : Résultat du test de KS comparant les distributions de 6h et 7h pour mars 2014

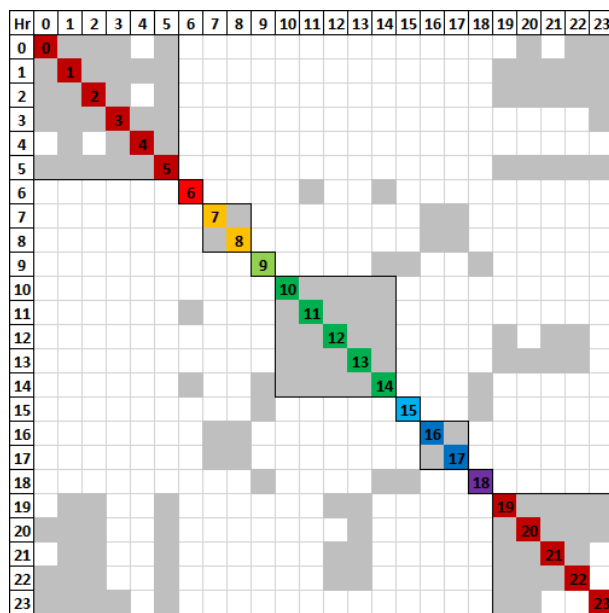
Des tests de KS successifs sont effectués sur chaque paire d'heures pour générer une matrice de similarité symétrique 24x24 des plus grandes distances D entre les FDC de chaque heure. La Figure 5-6 est un échantillon de la matrice entre 0h et 11h pour mars 2014. Les petites valeurs (en rouge) de D_{ij} signifient que FDC_i et FDC_j sont plutôt similaires, tandis que les valeurs élevées (en vert) de D_{ij} signifient que FDC_i et FDC_j sont plutôt différents. On peut observer par exemple que les FDC de 7h et 8h sont similaires (4,9%) et qu'ils sont assez différents des autres FDC de 0h à 11h. On retrouve également la valeur de 15,9% (en gras) entre 6h et 7h, telle que montrée à la Figure 5-5.

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0		3,3%	1,7%	3,9%	8,4%	5,0%	8,2%	23,9%	25,7%	14,3%	9,2%	7,2%
1	3,3%		1,8%	3,6%	9,1%	5,8%	10,8%	26,6%	28,5%	15,4%	9,2%	7,8%
2	1,7%	1,8%		4,0%	8,9%	4,9%	9,3%	25,0%	26,9%	14,4%	9,3%	7,3%
3	3,9%	3,6%	4,0%		5,5%	2,5%	11,6%	27,1%	29,1%	16,8%	12,0%	9,6%
4	8,4%	9,1%	8,9%	5,5%		5,1%	15,5%	30,8%	32,9%	22,3%	17,4%	15,0%
5	5,0%	5,8%	4,9%	2,5%	5,1%		12,3%	27,6%	29,8%	18,8%	13,4%	11,7%
6	8,2%	10,8%	9,3%	11,6%	15,5%	12,3%		15,9%	18,4%	10,7%	5,8%	3,4%
7	23,9%	26,6%	25,0%	27,1%	30,8%	27,6%	15,9%		4,9%	11,3%	17,5%	18,9%
8	25,7%	28,5%	26,9%	29,1%	32,9%	29,8%	18,4%	4,9%		13,3%	19,6%	20,9%
9	14,3%	15,4%	14,4%	16,8%	22,3%	18,8%	10,7%	11,3%	13,3%		6,5%	7,9%
10	9,2%	9,2%	9,3%	12,0%	17,4%	13,4%	5,8%	17,5%	19,6%	6,5%		2,6%
11	7,2%	7,8%	7,3%	9,6%	15,0%	11,7%	3,4%	18,9%	20,9%	7,9%	2,6%	

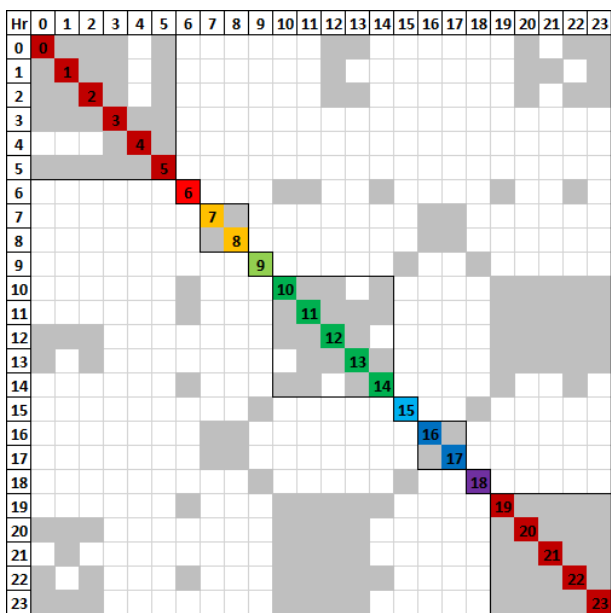
Figure 5-6 : Matrice des distances D entre les distributions de chaque paire d'heure

Le résultat complet pour les 24 heures de la journée est présenté aux Figure 5-7a et Figure 5-7b. Dans le cadre de ce mémoire, les critères retenus pour décider si deux heures consécutives doivent être regroupées est $D < 7\%$ pour février et $D < 6\%$ pour mars. Cette procédure a généré huit périodes horaires différentes et les résultats entre février et mars sont similaires. Les périodes horaires obtenues sont également regroupées de façon intuitive :

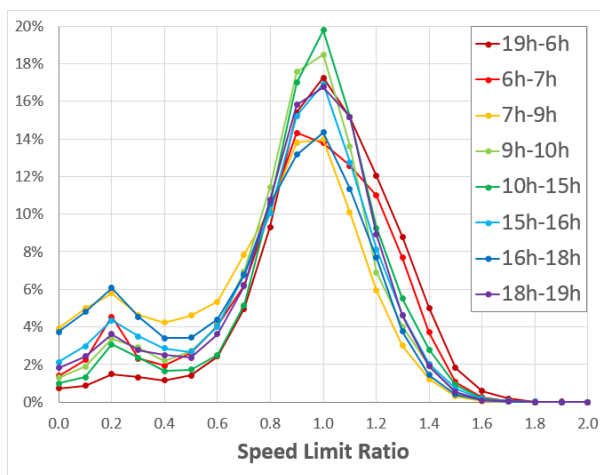
- 6h-7h pré-pointe AM
- 7h-9h pointe AM
- 9h-10h post-pointe AM
- 10h-15h milieu de la journée
- 15h-16h pré-pointe PM
- 16h-18h pointe PM
- 18h-19h post-pointe PM
- 19h-6h nuit



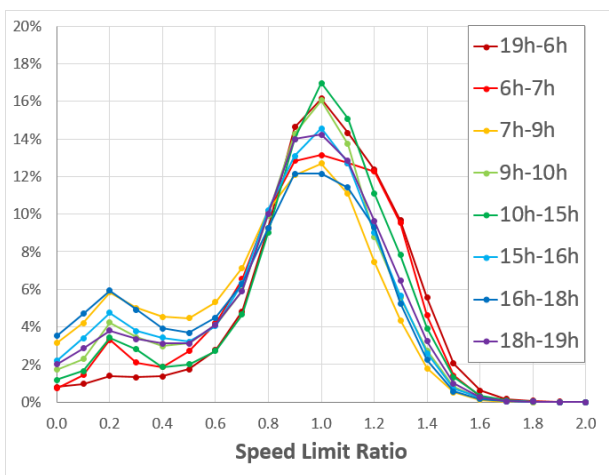
(a) Matrice du test de KS pour février avec les paires qui respectent le critère $D < 7\%$ (en gris)



(b) Matrice du test de KS pour mars avec les paires qui respectent le critère $D < 6\%$ (en gris)



(c) Distribution fréquentielle du RLV en février



(d) Distribution fréquentielle du RLV en mars

Figure 5-7 : Création des périodes horaires : Matrice des résultats des tests de KS (a,b) et les distributions fréquentielles du RLV (c,d) pour février et mars

Les matrices détaillées du test de KS sont présentées à l'Annexe 5.

5.4.2 Attributs spatiaux

La congestion varie également dans l'espace donc il est important d'ajouter des variables spatiales aux modèles. Les huit régions représentées sur la Figure 5-3 sont utilisées pour tenir compte des variations spatiales. Au départ, la limite de vitesse pour chaque tronçon de 100 m était également considérée comme attribut spatial pour le modèle. Par contre, une forte corrélation linéaire (0,69) a été observée entre ces deux variables (*region08* et *v_affichee*), tel que montré à la Figure 5-8. Sachant qu'il risque d'avoir des erreurs dans les coefficients estimés car leur corrélation fait en sorte qu'une des deux variables peut capter une partie de l'effet de l'autre, il a été décidé d'enlever la variable de limite de vitesse et de conserver uniquement la région.

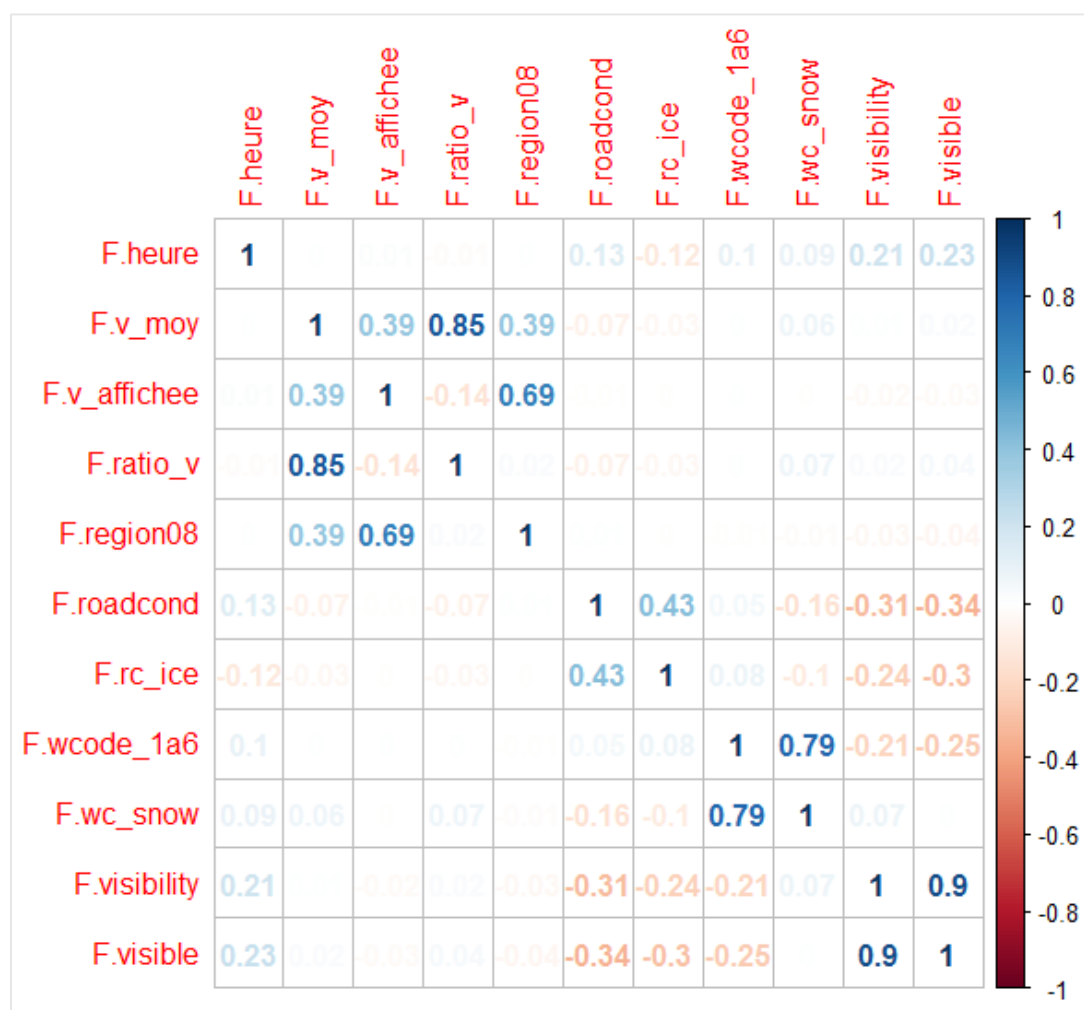


Figure 5-8 : Matrice de corrélation des variables utilisées pour février 2014

5.4.3 Attributs météorologiques

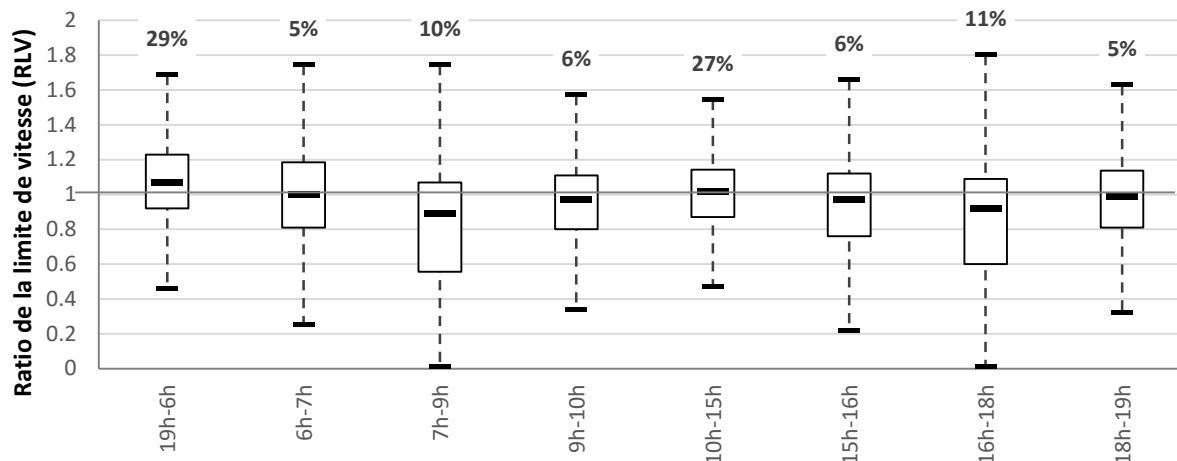
Des tests préliminaires ont montré que l'utilisation de tous les types d'état de la chaussée dans le même modèle n'améliorait pas nécessairement celui-ci. Une analyse de corrélation a également été effectuée pour vérifier que la corrélation entre les variables était toujours acceptable, soit entre -0,4 et 0,4 (voir l'Annexe 5). Un choix méthodologique était de se concentrer uniquement sur des variables hivernales (chaussée glacée et neige), de sorte que les variables binaires sont créées pour chaque attribut météo utilisant la logique suivante :

- Chaussée glacée : 1 = (État de chaussée = Glacée), 0 = (État de chaussée ≠ Glacée)
- Chute de neige : 1 = (Météo = Neige), 0 = (Météo ≠ Neige)
- Bonne visibilité : 1 = (Visibilité = 3,1 km), 0 = (Visibilité < 3,1 km)

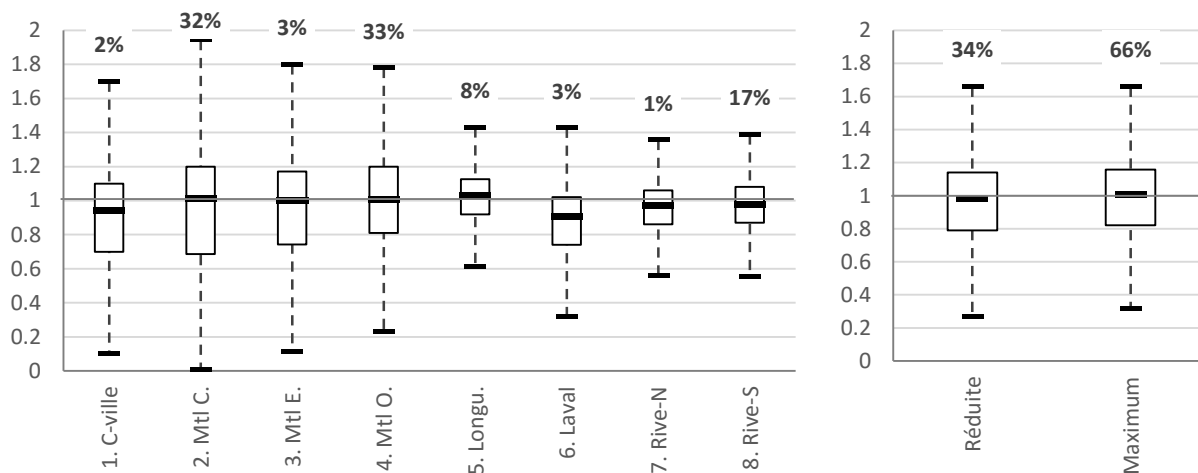
5.4.4 Analyse descriptive

Les distributions des données de ratio de la limite de vitesse (RLV) par rapport à toutes les variables sont présentées à la Figure 5-9. Ces distributions sont celles du mois de février; les distributions pour mars sont assez semblables (voir l'Annexe 5). Chaque distribution est représentée par une boîte à moustaches typique montrant les trois principaux quartiles (Q1, Q2 = médiane et Q3) et les extrémités des moustaches sont définies par le quartile $\pm 1,5$ fois l'intervalle interquartile (Q3-Q1). Les valeurs de pourcentage au-dessus des graphiques indiquent le nombre d'observations correspondant à chaque valeur de la variable catégorielle. Par exemple, la base de données pour février contient 603 037 enregistrements dont 176 863 enregistrements durant la nuit (19h-6h), qui correspond à 29 % des données.

La Figure 5-9a permet de voir la variation du RLV durant et hors des heures de pointe quotidiennes; le RLV est plus faible en période de pointe. La répartition spatiale de la Figure 5-9b indique essentiellement qu'il y a plus de variabilité sur l'île de Montréal (régions 1 à 4), quel que soit le nombre d'observations. Ensuite, la visibilité semble affecter légèrement le RLV (Figure 5-9c) puisque la médiane du RLV pour la visibilité maximale (3,1 km) est supérieure à 1 alors que la médiane pour la visibilité réduite est légèrement inférieure à 1. Les Figure 5-9d et Figure 5-9e donnent une perspective sur l'effet de la chaussée glacée (21 % des observations) et de la neige (17 % des observations), et on n'observe aucune tendance particulière entre les différentes conditions.

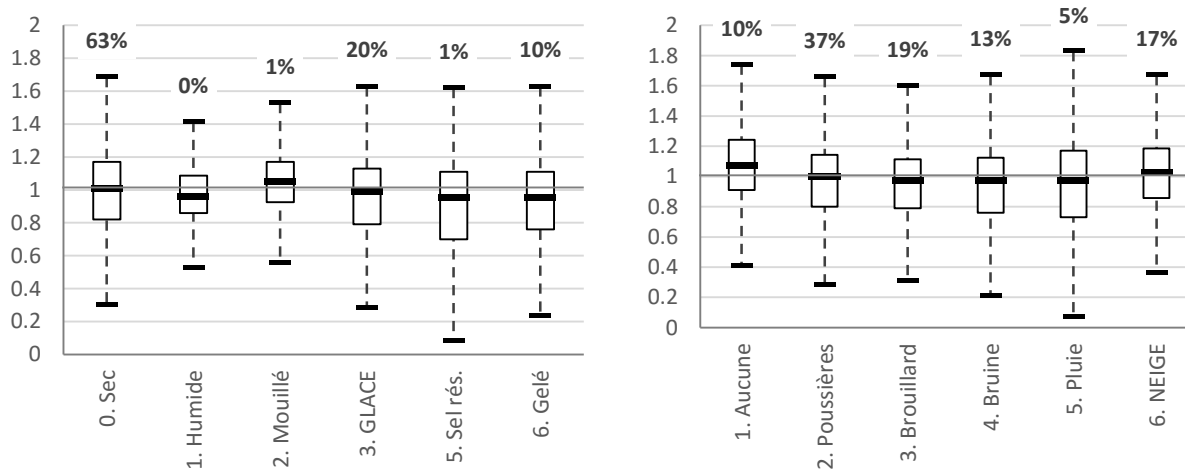


(a) Distribution du RLV selon la période horaire



(b) Distribution du RLV selon la région

(c) RLV selon la visibilité



(d) RLV selon les conditions routières

(e) RLV selon les conditions météo

Figure 5-9 : Distributions des données du RLV en fonction de toutes les variables explicatives pour le mois de février 2014 (603 037 observations)

5.5 Résultats des modèles

Les modèles descriptifs ont été calculés en utilisant R, un des langages statistiques les plus puissants et actuellement un des logiciels les plus utilisés, surtout en raison de sa nature ouverte. Deux types de résultats sont extraits des modèles LOGIT : le rapport des cotes ou « odds ratio » (OR) et la probabilité d'occurrence de la congestion. Les résultats sont analysés en trois parties : les impacts relatifs des conditions météorologiques sur la congestion, l'effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion et l'effet du seuil de congestion.

5.5.1 Impacts relatif des conditions météorologiques sur la congestion

Le premier modèle LOGIT utilise le seuil de 60 % du ratio de la limite de vitesse (RLV). Les résultats détaillés des modèles sont présentés au Tableau 5-1 pour février et au Tableau 5-2 pour mars. La robustesse du modèle est évaluée par le pseudo- R^2 de McFadden, (souvent notée ρ^2) dont on reconnaît qu'il présente des valeurs plus petites que le R^2 traditionnel et pour lequel des valeurs de 0,2 à 0,4 sont considérées comme très satisfaisante (Domencich et McFadden, 1975). Son équation est la suivante :

$$R^2_{\text{McFadden}} = \rho^2 = 1 - \ln(L_M) / \ln(L_0)$$

Où : L_M : probabilité estimée avec les prédicteurs du modèle

L_0 : probabilité estimée sans les prédicteurs

Les modèles obtenus ont un ρ^2 de 0,130 (février) et 0,096 (mars), qui est plus faible que les valeurs satisfaisantes, mais reste suffisant pour discuter de l'impact relatif des conditions météorologiques sur l'occurrence de la congestion sur les autoroutes de la région de Montréal.

L'*odds ratio* (OR), ou rapport des cotes, est une mesure statistique calculée par cette équation :

$$OR = \frac{p_1/(1-p_1)}{p_0/(1-p_0)} \quad \text{où} \quad \begin{cases} p_1 = P(\text{congestion} | X_i = 1) \\ p_0 = P(\text{congestion} | X_i = 0) \\ X_i : \text{chaque variable explicative binaire} \end{cases}$$

Il est aussi égal à l'exponentielle du coefficient estimé par le modèle logistique pour la variable indépendante correspondante, soit :

$$OR = e^{\beta_i} \quad \text{où } \beta_i \text{ est le } i^{\text{ème}} \text{ coefficient du modèle}$$

L'OR permet d'estimer l'impact relatif des variables météorologiques sur la probabilité de congestion $P(RLV < 60 \%)$, puisque la variation du rapport des cotes de la congestion est calculée par : $OR-1$. Règle générale, lorsque le rapport des cotes augmente, la probabilité de congestion est influencée dans le même sens.

Ainsi, on peut déduire qu'une chaussée glacée augmente le rapport des cotes de la congestion de 20 % (février) et de 71 % (mars) par rapport à des conditions non glacées, ce qui est une différence considérable entre les deux mois. D'autre part, les chutes de neige augmentent le rapport des cotes de 29 % en mars, mais le diminuent de 3% en février, ce dernier n'étant toutefois pas aussi significatif avec une p-value élevée. L'impact négatif des chutes de neige peut être le résultat de la corrélation négative (-0,1) observée entre les chutes de neige et la chaussée glacée.

Les modèles montrent qu'une bonne visibilité diminue le rapport des cotes de la congestion de 14 % en février et de 12 % en mars par rapport à des conditions de visibilité réduite, c'est-à-dire qu'une visibilité réduite augmente le risque de congestion. Cette valeur relativement similaire entre les deux modèles pourrait être considérée comme un effet général de la visibilité réduite pour toute la région métropolitaine ou pour chaque période horaire.

Sans surprise, les rapports de cotes montrent aussi que la période horaire a un impact très important sur la congestion routière, et beaucoup plus important que les autres variables. Par exemple, le rapport des cotes de la congestion est 8,4 fois plus élevé de 7h à 9h un matin de semaine que durant la nuit (19h à 6h) et 7,7 fois plus élevé entre 16h et 18h en fin de journée pour février 2014 (respectivement 7,1 et 7,5 pour mars 2014). Ces valeurs montrent à quel point l'augmentation de la demande en période de pointe influence la congestion. L'impact des différentes régions est également important, mais dans une moindre mesure. Par exemple, le rapport des cotes de la congestion est 89 % moins élevé sur la couronne de la rive-sud qu'au centre-ville de Montréal en février 2014 (respectivement 81 % en mars 2014). L'effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion est étudié à la sous-section suivante.

Tableau 5-1 : Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en février 2014

FÉVRIER 2014	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)		OR	OR-1
Constante :	-2,515	0,028	-88,95	< 2e-16	***	0,081	-91,9%
Périodes horaires : Réf. 19h-6h							
6h-7h	1,172	0,021	55,58	< 2e-16	***	3,230	223,0%
7h-9h	2,123	0,016	135,11	< 2e-16	***	8,353	735,3%
9h-10h	1,257	0,020	62,65	< 2e-16	***	3,517	251,7%
10h-15h	0,861	0,015	56,08	< 2e-16	***	2,366	136,6%
15h-16h	1,595	0,019	84,07	< 2e-16	***	4,926	392,6%
16h-18h	2,047	0,015	132,51	< 2e-16	***	7,743	674,3%
18h-19h	1,296	0,021	61,14	< 2e-16	***	3,654	265,4%
Régions : Réf. Centre-ville + Mtl-Centre							
Montréal-Est	0,236	0,030	7,75	9,57E-15	***	1,266	26,6%
Montréal-Ouest	-0,750	0,026	-29,09	< 2e-16	***	0,472	-52,8%
Longueuil	-1,421	0,032	-44,86	< 2e-16	***	0,241	-75,9%
Laval	-0,069	0,032	-2,17	0,030	*	0,934	-6,6%
Rive-Nord	-1,026	0,049	-20,75	< 2e-16	***	0,359	-64,1%
Rive-Sud	-2,207	0,031	-70,65	< 2e-16	***	0,110	-89,0%
Variables météorologiques : Réf. Chaussée non-glacée, Pas de neige, Visibilité réduite							
Chaussée glacée	0,182	0,011	17,12	< 2e-16	***	1,199	19,9%
Chute de neige	-0,032	0,013	-2,45	0,014	*	0,968	-3,2%
Bonne visibilité	-0,146	0,010	-14,63	< 2e-16	***	0,864	-13,6%
Résidus :							
	Min	1Q	Médiane	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²	
	-1,1884	-0,5518	-0,3666	-0,2215	3,1328	0,130	

Tableau 5-2 : Modèle de probabilité de congestion pour un RLV < 0,6 en mars 2014

MARS 2014	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)		OR	OR-1
Constante :	-2,535	0,024	-105,46	< 2e-16	***	0,079	-92,1%
Périodes horaires : Réf. 19h-6h							
6h-7h	0,812	0,020	41,57	< 2e-16	***	2,251	125,1%
7h-9h	1,959	0,013	148,13	< 2e-16	***	7,089	608,9%
9h-10h	1,283	0,017	75,28	< 2e-16	***	3,608	260,8%
10h-15h	0,865	0,013	68,21	< 2e-16	***	2,375	137,5%
15h-16h	1,699	0,016	105,02	< 2e-16	***	5,471	447,1%
16h-18h	2,019	0,013	152,68	< 2e-16	***	7,533	653,3%
18h-19h	1,425	0,017	82,87	< 2e-16	***	4,158	315,8%
Régions : Réf. Centre-ville							
Montréal-Centre	-0,088	0,022	-4,08	0,0000456	***	0,915	-8,5%
Montréal-Est	0,094	0,026	3,67	0,000239	***	1,099	9,9%
Montréal-Ouest	-0,938	0,022	-42,52	< 2e-16	***	0,391	-60,9%
Longueuil	-0,823	0,037	-22,49	< 2e-16	***	0,439	-56,1%
Laval	-0,491	0,027	-18,17	< 2e-16	***	0,612	-38,8%
Rive-Nord	-1,325	0,042	-31,59	< 2e-16	***	0,266	-73,4%
Rive-Sud	-1,633	0,042	-38,68	< 2e-16	***	0,195	-80,5%
Variables météorologiques : Réf. Chaussée non-glacée, Pas de neige, Visibilité réduite							
Chaussée glacée	0,534	0,014	39,47	< 2e-16	***	1,705	70,5%
Chute de neige	0,255	0,010	26,58	< 2e-16	***	1,290	29,0%
Bonne visibilité	-0,123	0,009	-13,10	< 2e-16	***	0,885	-11,5%
Résidus :							
	Min	1Q	Médiane	3Q	Max	McFadden pseudo-R ²	
	-1,1994	-0,5964	-0,3853	-0,2638	2,9338	0,096	

5.5.2 Effet des variables spatiotemporelles sur la probabilité de congestion

La probabilité d'occurrence de la congestion peut être calculée en utilisant la constante du modèle (β_0) et les coefficients (β_i) estimés pour chaque condition spatiotemporelle et météorologique ($X_i = 1$ ou 0). Elle est calculée par cette équation :

$$\text{Probabilité}_{\text{congestion}} = P(\text{RLV} < \text{seuil}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \times X_1 + \dots + \beta_5 \times X_5)}}$$

Par exemple, on peut calculer la probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour les conditions suivantes : chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige. L'équation suivante est utilisée pour février 2014 :

$$P(\text{RLV} < 0,6) = \frac{1}{1 + e^{-(-2,515 + \beta_{\text{periode horaire}} + \beta_{\text{region}} + 0,182 - 0,146)}}$$

Les résultats complets sont présentés à la Figure 5-10. On remarque des pics à près de 50 % de probabilité de congestion aux heures de pointe. Par exemple, la probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est lorsque la chaussée est glacée et que la visibilité est bonne sans précipitation de neige est de 47 % pour février 2014. Cette probabilité serait de 43 % si la chaussée n'était pas glacée, donc l'effet de la chaussée glacée est de 4 % pour ce mois. Les probabilités pour mars 2014 sont respectivement de 48 % avec chaussée glacée et 35 % sans chaussée glacée, donc l'effet de cette variable est beaucoup plus importante en mars, tel que discuté à la sous-section précédente.

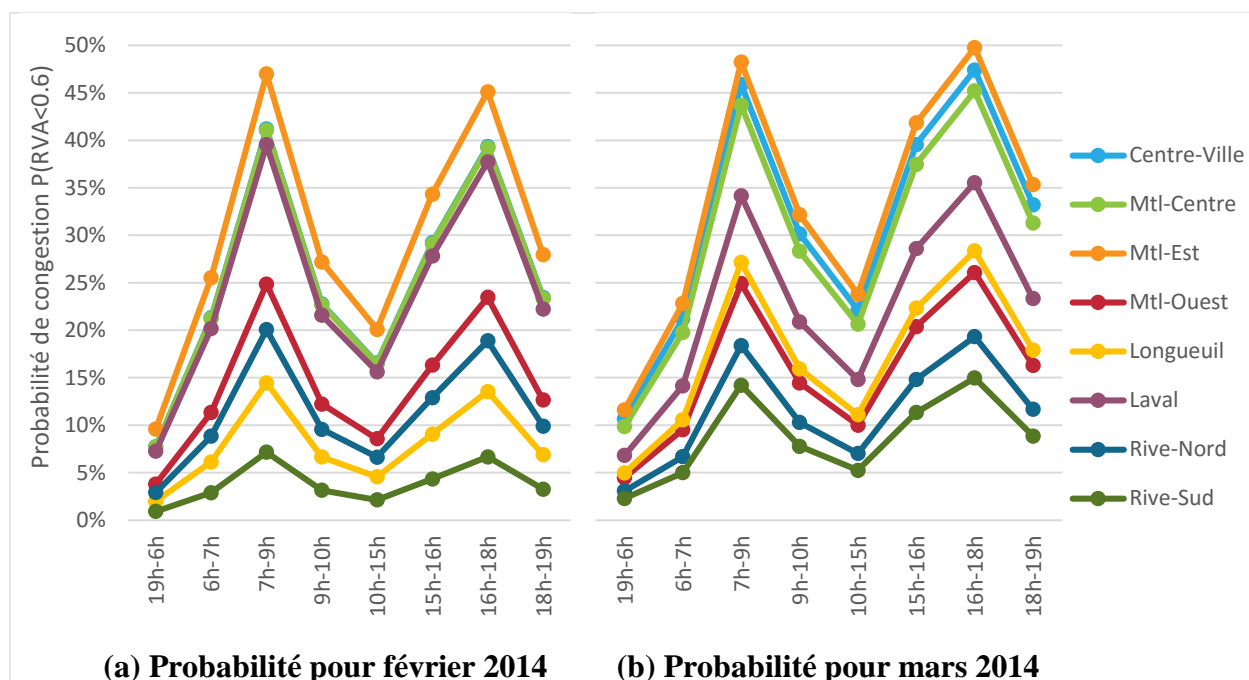


Figure 5-10 : Probabilité de congestion pour un seuil de 60 % du RLV selon la période horaire et la région pour une chaussée glacée, bonne visibilité et aucune précipitation de neige

La Figure 5-10 montre également la variation spatiale de la probabilité de congestion. En effet, sur les deux mois elle atteint seulement un maximum de 15 % et 20 % pour la couronne sud et nord respectivement. On remarque aussi que la probabilité de congestion pour Longueuil est pratiquement le double en mars par rapport à février. On ne peut que conclure que la probabilité de congestion varie énormément dans le temps et l'espace. Il est important de noter qu'il y a peut-être eu des événements qui ne sont pas contrôlés dans le modèle; la constante est importante et inclus l'effet de toutes les variables non incluses dans le modèle et cela expliquerait le faible ρ^2 .

5.5.3 Effet du seuil de congestion sur la probabilité

Il n'y a pas de définition unique de la congestion, ni une valeur unique de seuil de congestion. Les modèles présentés dans les sous-sections précédentes dépendent du choix du seuil de congestion qui était de 60 %. Dix-huit nouveaux modèles ont été estimés avec un seuil d'état de la circulation allant de 10 % à 100 % pour voir les variations au niveau des impacts des conditions météorologiques sur la circulation pour différents seuils; évidemment, lorsque le seuil est fixé à 90% ou plus, on ne peut plus parler de congestion et il est plus juste alors de parler de seuil permettant de comparer différents états de la circulation.

La Figure 5-11 montre la probabilité que la circulation soit au dessus d'un certain seuil entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale selon le mois. Sans surprise, on remarque d'abord que la probabilité augmente lorsque les conditions sont mauvaises (chaussée glacée, chute de neige et visibilité réduite combinées). On constate également que l'effet des mauvaises conditions sur la probabilité augmente avec le seuil, mais pas de manière linéaire. D'ailleurs cet effet est beaucoup plus important en mars qu'en février. Par exemple, la probabilité est de 35 % lorsque les conditions météorologiques sont bonnes et 58 % sinon pour un seuil de 0,6 en mars. Ces valeurs deviennent 20 % et 24 % pour un seuil de 0,3. Le choix du seuil d'état de la circulation a donc une influence non-négligeable sur l'impact des conditions météorologiques sur la probabilité de l'occurrence de cet état de circulation. Il serait intéressant de construire des modèles logistique de type multinomial et de considérer différentes classes d'état de la circulation définies par des seuils de RLV.

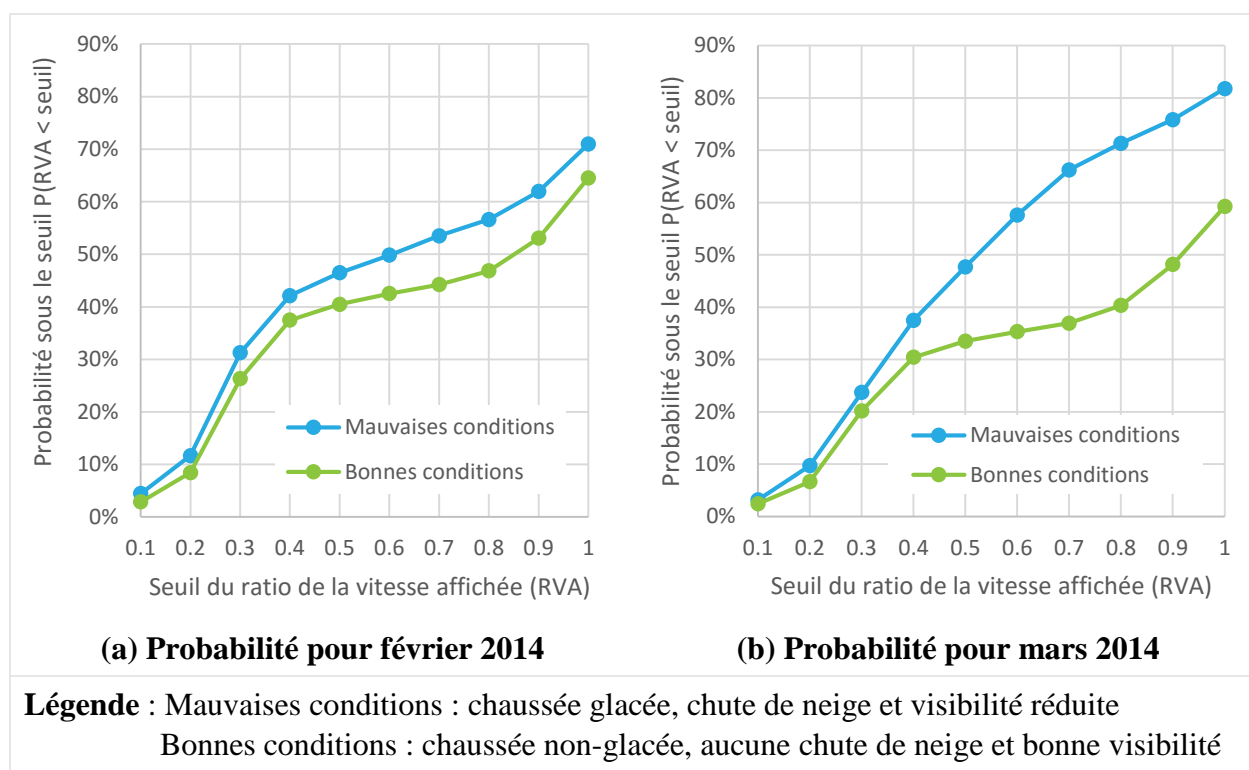


Figure 5-11 : Probabilité de congestion entre 7h et 9h à Montréal-Est selon la condition météorologique hivernale pour différents seuils de congestion en février (a) et mars (b)

5.6 Synthèse

Ce chapitre a présenté une méthodologie pour évaluer l'impact des variables météorologiques sur les conditions de circulation. L'objectif principal était de développer une telle méthodologie pour l'inclure dans un outil d'analyse de la congestion à Montréal. Cette méthodologie utilise notamment le test de Kolmogorov-Smirnov pour regrouper des périodes horaires consécutives de circulation similaire. Des modèles logistiques de probabilité de l'occurrence de la congestion sont développés en incluant différentes variables : la période horaire, le type de route (région et limite de vitesse), les attributs météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). L'étude de cas portait sur les autoroutes de la région de Montréal, durant les mois de février et mars, pour se concentrer sur les variables hivernales (chaussée glacée et chute de neige).

Plusieurs modèles descriptifs ont été calculés en utilisant R, desquels ont été extraits le rapport des cotes et la probabilité que l'état de la circulation soit sous un certain seuil. À la lumière des résultats analysés, on peut conclure que les conditions météorologiques ont un impact sur la congestion. De plus, on confirme que la variation spatiotemporelle de la probabilité de congestion doit être considérée dans les modèles. Finalement, on peut valider que la méthodologie employée pour générer des modèles explicatifs est adéquate pour être intégrée à un outil de consultation à Montréal.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

L'objectif de ce projet de recherche était de développer des indicateurs d'analyse et de suivi de la congestion routière dans le but de contribuer au développement d'un outil de consultation pour la région métropolitaine de Montréal pour le ministère des Transports du Québec (MTQ). Ce dernier chapitre vise d'abord à faire la synthèse des principaux travaux réalisés pour répondre à cet objectif. Les contributions méthodologiques, analytiques et opérationnelles de ce projet de recherche sont ensuite énumérées. Une section énonce également les nombreuses limites associées aux analyses et méthodologies présentées. Enfin, plusieurs pistes de recherche sont suggérées pour poursuivre et élargir l'étude de la congestion routière.

6.1 Synthèse des travaux

Premièrement, une revue de littérature a permis d'étudier les différents paramètres (définitions, seuils d'acceptabilité, causes, impacts, solutions, « bénéfiques » et mesures) liés à la congestion routière et de proposer une définition qui tient compte de tous les paramètres pertinents : *La congestion routière est un phénomène physique et relatif qui survient lorsque les paramètres de la circulation (volume, vitesse et dérivés) deviennent moins désirables que les valeurs de référence fixées et qui varie selon le temps, l'espace, la cause (récurrente et incidente) et le seuil d'acceptabilité.* La revue de littérature a également permis d'identifier une liste de 24 indicateurs adéquats pour l'évaluation de la congestion selon six catégories : vitesse, débit et capacité, temps et retard, indicateurs spatiaux, fiabilité et coûts. De ces indicateurs, les plus simples ont été choisis dans un intérêt de développement méthodologique.

Deuxièmement, une méthodologie d'estimation d'indicateurs de la congestion à partir de données de traces GPS a été développée. Cette méthodologie comprend le traitement des données de mesure, de réseau et explicatives et la fusion de ces données pour former une base de données qui permet de calculer des indicateurs selon plusieurs objets de visualisation et sélections spatiotemporelles. Tout d'abord, les données de traces GPS de la flotte de Taxi Diamond ont été nettoyées pour être appariées aux tronçons de 100 m du réseau routier sous la juridiction du MTQ, pour lesquels la limite de vitesse a été codifiée. Ces deux bases de données ont été fusionnées selon deux critères de jointure spatiale (distance et azimuth) pour former une base de données de

circulation, utilisée pour le calcul d'indicateurs. En parallèle, des données d'une station météorologique ont été traitées pour être jointes temporellement à la base de données de circulation, afin de former une base de données qui a été utilisée pour fins de modélisation. Ensuite, les équations des indicateurs choisis et les hypothèses d'un seuil d'acceptabilité de la congestion ont été présentées. Finalement, la méthodologie de création des objets de visualisation est décrite.

Troisièmement, la méthodologie développée a été appliquée pour évaluer des indicateurs de la congestion routière selon différents objets d'étude et de visualisation pertinents pour le développement d'un outil d'analyse et de suivi de la circulation. Trois d'objets d'étude ont été utilisés, soit le corridor de l'autoroute 40 sur l'île de Montréal, dont son segment « entre les deux 15 » et le pont de l'Île-aux-Tourtes, l'accès au Pont Champlain en direction de Montréal par les autoroutes 10 et 30 et les routes 132 et 134 et le réseau routier de la région de Montréal en entier. L'évaluation des indicateurs a été réalisée en utilisant quatre objets de visualisation (distribution, courbe cumulée, grille de congestion et carte de congestion) et sept indicateurs (vitesse moyenne, ratio de la limite de vitesse, temps de parcours moyen et cumulé, retard moyen et cumulé et pourcentage en congestion). Cela a permis d'analyser adéquatement la variation des conditions de circulation pour les trois objets identifiés et de valider la méthodologie de développement d'indicateurs proposée.

Finalement, une méthodologie d'évaluation des impacts des conditions météorologiques sur les conditions de circulation a été présentée. Cette méthodologie utilise notamment le test de Kolmogorov-Smirnov pour regrouper des périodes horaires consécutives avec des conditions de circulation similaires. Des modèles logistiques de probabilité de l'occurrence de la congestion sont développés en incluant différentes variables : la période horaire, la région et les attributs météorologiques (état de la chaussée, type de précipitation et visibilité). L'étude de cas portait sur les autoroutes de la région de Montréal, durant les mois de février et mars, pour se concentrer sur les variables hivernales (chaussée glacée et chute de neige). Plusieurs modèles descriptifs ont été calculés en utilisant R, permettant de conclure que les conditions météorologiques ont un impact sur la probabilité de congestion et que la méthodologie employée est adéquate pour être intégrée à un outil de consultation à Montréal.

6.2 Contributions

Ce projet de recherche a apporté plusieurs contributions aux niveaux des méthodes, de l'analyse et de l'opérationnalisation des travaux réalisés.

Dans un premier temps, on retrouve des contributions méthodologiques. D'abord, la méthodologie de création d'une base de données de circulation à partir de données de traces GPS de flotte de taxi sera utile pour de nombreux projets d'analyse de la circulation. Les données de traces GPS étant universelles, cette méthode s'applique également ailleurs avec d'autres sources de traces GPS. Ensuite, la codification des vitesses affichées permet de caractériser les tronçons pour les fins de modélisation. Les différentes méthodologies de construction des objets de visualisation constituent également une contribution méthodologique, surtout la visualisation à l'aide d'une courbe cumulée qui n'a jamais été faite auparavant. Finalement, la méthode de regroupement des périodes horaires similaires développée à l'aide du test statistique de Kolmogorov-Smirnov sera utile pour toute modélisation des conditions de circulation.

Dans un second temps, des contributions analytiques ont été faites. L'étude des conditions de circulation sur l'autoroute 40 à Montréal, à l'approche du Pont Champlain en direction de Montréal et sur le réseau en entier a permis de dresser un meilleur portrait de la congestion dans la région, selon plusieurs paramètres spatiotemporels. Ces analyses pourront être généralisées à l'ensemble du réseau afin de produire un rapport complet et périodique de la congestion.

Finalement, ce projet apporte des contributions opérationnelles, puisque les indicateurs développés pourront être utilisés dans le développement d'un outil d'analyse et de suivi des conditions de circulation à Montréal. Cet outil de consultation permettra de produire des objets de visualisation utiles pour la planification, la modélisation et la gestion du réseau routier du MTQ.

6.3 Limitations

Les résultats produits dans le cadre de ce projet ont toutefois plusieurs limitations qui doivent être soulignées. Tout d'abord, les données de traces GPS proviennent uniquement d'une flotte de taxi. Il est juste d'argumenter que les taxis ne sont pas nécessairement représentatifs de l'ensemble des véhicules dans la circulation. En effet, les chauffeurs de taxi n'ont pas nécessairement les mêmes comportements que les jeunes ou les véhicules lourds sur la route. Les résultats présentés reposent cependant sur l'hypothèse que la vitesse moyenne des taxis est représentative de la vitesse moyenne

de tous les autres véhicules. De plus, le réseau routier possède des voies réservées aux taxis qui n'ont pas été prises en compte dans ce projet.

Le réseau routier a également de nombreuses limitations. Seulement la ligne centrale des routes était disponible et l'information sur la largeur des voies n'était pas disponible sur l'ensemble du réseau. Ainsi, une hypothèse de largeur de tronçon de 24 m a été appliquée à tout le réseau. De plus, les bretelles des échangeurs et les voies de services ont été ignorées pour simplifier les calculs. La présence de feux de signalisation à certaines intersections du réseau a également été ignorée.

La limite de vitesse, codifiée sur chacun des tronçons de 100 m du réseau à l'aide du service *Google Street View*, pose une limite importante, puisque les images de ce service n'étaient pas nécessairement à jour. De plus, cette méthode de codification rend la limite de vitesse fixe dans le temps, alors qu'en réalité elle peut changer lorsqu'il y a des zones de travaux, lorsqu'il y a des panneaux de vitesse variable et selon l'application de nouvelles normes.

L'utilisation d'une seule station météorologique pose également une limite à considérer, même si on peut supposer que les conditions météorologiques sont uniformes sur la région de Montréal. En réalité, il y a des conditions météorologiques très locales qui peuvent avoir des impacts importants sur la circulation. Minimale, la météo a été considérée dans les analyses. Une des plus grandes limites aux analyses de la circulation est l'absence d'autres données explicatives, comme des données de travaux, d'accidents et autres événements spéciaux comme les jours fériés. Il est en effet délicat d'analyser les variations de la congestion sans tenir compte des multiples facteurs explicatifs.

Finalement, la majorité des indicateurs de la congestion nécessite une valeur de référence et un seuil d'acceptabilité de la congestion. La limite de vitesse et 60 % de cette vitesse sont respectivement les choix méthodologiques réalisés dans le cadre de ces travaux. Ces valeurs ont également leurs limites puisque certaines analyses dépendent de ces hypothèses qui sont subjectives. Un sondage pour connaître la tolérance à la congestion et une analyse de sensibilité de la mesure de la congestion en fonction des seuils sont les solutions potentielles à cette dernière limite.

6.4 Perspectives

La congestion routière est un phénomène complexe, variable, imprévisible et qui évolue dans le temps. C'est un domaine de recherche où des besoins de nouveaux développements apparaîtront toujours pour comprendre les impacts des nouvelles tendances de mobilité sur le réseau routier.

Une première perspective de recherche concerne l'analyse de sensibilité des hypothèses utilisées pour l'intersection spatiale (distance et azimuth), pour le seuil d'acceptabilité de la congestion et pour la valeur de référence. Par exemple, une analyse de sensibilité de la distance d'appariement permettrait de déterminer l'effet des hypothèses de largeur de réseau sur les résultats et de déterminer l'hypothèse idéale selon les paramètres. Dans ce cas, la disponibilité de données de largeur et de nombre de voies serait également souhaitée.

Des recherches futures pourraient s'intéresser à la problématique d'actualisation du réseau routier dans les analyses de congestion. Il y a un besoin de développer des indicateurs de tendances lourdes qui sont comparables entre des réseaux différents. L'étude des conditions de circulation sur un réseau doit considérer l'historique de ces modifications, ce qui n'est actuellement pas fait.

L'intégration de nouveaux types de données de mesure telles que des données de débit et d'autres sources de données GPS doit être étudiée. Le débit de la circulation permet d'évaluer les coûts totaux engendrés par la congestion. Les méthodes actuelles utilisent des débits annualisés qui ne reflètent pas la variation des débits dans le temps. D'autres sources de données GPS à considérer incluent notamment les flottes de camionnage et les véhicules équipés par leur compagnies d'assurance.

Ce projet souffre de l'absence d'étude d'autres données explicatives, telles que travaux, incidents et autres événements spéciaux. L'enjeu est surtout au niveau de la standardisation de ces bases de données. Par exemple, à l'heure actuelle, les données d'incidents sont recueillies manuellement par les agents du MTQ sur la route mais ajoutées beaucoup plus tard à une base de données sans référence géographique. Sinon, les incidents sont observés par les caméras du Centre intégré de gestion de la circulation de la Direction de l'Île-de-Montréal (CIGC-DIM), pour être publiés via réseaux sociaux, mais sans conserver les informations dans une base de données standardisée. Il serait donc pertinent de créer une interface qui permet d'entrer et conserver les données d'incidents en continu, en utilisant un format standard, que ce soit par les policiers ou agents du MTQ sur la

route, ou par les employés du CIGC-DIM, afin de documenter en temps réel et de façon continue les nombreux événements sur le réseau routier.

Un autre axe de recherche potentiel est au niveau de la représentativité des données. Il y a un besoin certain d'automatiser la méthode d'agrégation spatiotemporelle selon l'échantillon de données disponible. Cette automatisation devrait être dynamique et déterminer automatiquement la taille d'échantillon minimale requise pour une sélection spatiotemporelle et un indicateur donné.

Finalement, il y a une nécessité de développement des variables spatiales pour les besoins de modélisation. Un algorithme de regroupement des tronçons routiers présentant des conditions de circulation similaires doit être développé en reprenant les travaux de Loustau (2009) pour intégrer ces classes de tronçons dans les modèles.

BIBLIOGRAPHIE

- Aftabuzzaman, M. (2007). Measuring Traffic Congestion-A Critical Review. Présenté au 30th Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Australie.
- Agarwal, M., T. Maze, and R. Souleyrette. (2005). Impact of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames.
- Barreck, A. (2015). Navettage et épuisement professionnel selon la région et le moyen de transport: les résultats de l'étude SALVEO, Mémoire de maîtrise (M.Sc.), Faculté des études supérieures, Université de Montréal, 138 pages.
- Bertini, R. L. (2006). You Are the Traffic Jam: An Examination of Congestion Measures, Transportation Research Board, Washington DC.
- Boarnet, M. G., Kim, E. J., et Parkany, E. (1998). Measuring Traffic Congestion. Transportation Research Record, No. 1634, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Buisson C. et Lesort J-B. (2010). Comprendre le trafic routier : méthodes et calculs. Éditions du CERTU, Paris.
- Cambridge Systematics. (2005). Traffic Congestion and Reliability: Trends and Advanced Strategies for Congestion Mitigation.
- Cambridge Systematics, Dowling Associates, System Metrics Group, and Texas Transportation Institute. (2008). Cost-Effective Performance Measures for Travel Time Delay, Variation, and Reliability. NCHRP Report 618, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Cambridge Systematics, Inc., University of Maryland, Center for Advanced Transportation Technology, and Resource Systems Group. (2010). Measuring Transportation Network Performance. NCHRP Report 664, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Downs, A. (1992). Stuck In Traffic: Coping With Peak-Hour Traffic Congestion. Brookings Institution Press.
- Downs, A. (2004). Still Stuck In Traffic: Coping With Peak-Hour Traffic Congestion. Brookings Institution Press.
- Eisele, W. L., Schrank, D. L., et Fontaine, M. D. (2015). Preparing for MAP-21 System Performance Measures and Target-Setting Requirements: Lessons Learned in Virginia. Présenté au 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- FHWA (2006). Travel Time Reliability: Making It There On Time, All The Time. Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Flynn, M. R., Kasimov, A. R., Nave, J. C., Rosales, R. R., & Seibold, B. (2009). Self-sustained nonlinear waves in traffic flow. Physical Review E, 79(5), 056113.

- Gourvil, L., et F. Joubert. (2004). Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal. Ministère des Transports du Québec.
- Hallenbeck, M., O. Stewart, and A. V. Moudon. (2014). A Framework for MAP-21 Congestion Performance Measures and Targets. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- INRIX (2009). Benchmarking Traffic Data Quality: Best Practices for Analyzing the Quality of Traffic Information.
- Kay, J.H. (1997). Asphalt Nation: How the Automobile Took Over America, and How We Can Take It Back. Crown Publishers.
- Kwon J., M. Mauch, and P. Varaiya. (2006). The Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, And Excess Demand. Transportation Research Record, No. 1959, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 84–91.
- Ladier, C. (2006), Circulation routière : Usages et qualités des indicateurs, mémoire de maîtrise, INRETS/ENTPE, 86 pages.
- Lasley, P., T. Lomax, B. Eisele, and D. Schrank (2014). Developing A Total Peak Period Travel Time Performance Measure: Updated Concept Paper. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Les Conseillers ADEC inc. (2014). Évaluation des coûts de la congestion routière dans la région de Montréal pour les conditions de référence de 2008. Ministère des Transports du Québec.
- Les Conseillers ADEC inc. (2009). Évaluation des coûts de la congestion routière dans la région de Montréal pour les conditions de référence de 2003. Ministère des Transports du Québec.
- Litman, T. (2013). Critical Evaluation of the “Urban Mobility Report”. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2014). Congestion Evaluation Best Practices. Victoria Transport Policy Institute.
- Litman, T. (2015). Well Measured: Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute.
- Lomax, T. J., et Christiansen, D. L. (1982). Estimates of Relative Mobility in Major Texas Cities (Vol. 323). Texas Transportation Institute, Texas A&M University System.
- Lomax, T., et al. (1997). NCHRP Report 398: Quantifying Congestion, Volume 1: Final Report, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Loustau, P. (2009). Modélisation des temps de parcours sur un réseau routier à l’aide de données de véhicules flottants, Mémoire de maîtrise (M.Sc.A.), Département de mathématiques et génie industriel, Polytechnique Montréal, 215 pages.
- Loustau, P., V. Grasset, C. Morency, and M. Trépanier (2010). Comparing Floating Car Data and Carsharing GPS Data for Travel Time Assessment. Présenté au 12th World Conference on Transport Research, Lisbon, Portugal.

- Loustau, P., Morency, C., & Trepanier, M. (2010). Measuring, Describing and Modeling Travel Time Reliability. Présenté au 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Lund, A. S., and M. L. Pack. (2010). Dynamic Wide-Area Congestion and Incident Monitoring Using Probe Data. Transportation Research Record, No. 2174, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1–9.
- Lyman, K., et Bertini, R. L. (2008). Using travel time reliability measures to improve regional transportation planning and operations. Transportation Research Record, No. 2046, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1-10.
- Morency, C., M. Trépanier, et N. Saunier (2011). Évaluation des enjeux analytiques et des potentialités des données de temps de parcours pour mesurer la fiabilité du réseau routier montréalais, Ministère des Transports du Québec.
- Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE). (2007). Managing Urban Traffic Congestion, Paris, France.
- Pack, M. L. (2012). Wide-Area, Web-Based Mobility Analysis Using Probe Data. Présenté au 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
- Remias, S. M., T. M. Brennan, C. M. Day, H. T. Summers, D. K. Horton, E. D. Cox, and D. M. Bullock (2014). Spatially Referenced Probe Data Performance Measures for Infrastructure Investment Decision Makers. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Robitaille, M., et Nguyen, T. (2003). Évaluation de la congestion « De la théorie à la pratique » : Réseau routier de l'agglomération de Montréal, communication présentée au Congrès 2003 de l'Association des Transports du Canada, St John's–Terre-Neuve.
- Saunier, N., et C. Morency. Comparing Data from Mobile and Static Traffic Sensors for Travel Time Assessment, 1st Conference on Integrated Transportation & Development for a Better Tomorrow, Chicago, 2011.
- Schrank, D. L., Turner, S. M., et Lomax, T. J. (1993). Estimates of Urban Roadway Congestion-1990. Interim Report.
- Schrank, D. L., Eisele B., et Lomax, T. J. (2011). 2011 Urban Mobility Report. Texas A&M Transportation Institute.
- Schrank, D. L., Eisele B., et Lomax, T. J. (2012). 2012 Urban Mobility Report. Texas A&M Transportation Institute.
- Shaw, T. et PBS&J (2003). Performance Measures of Operational Effectiveness for Highway Segments and Systems, NCHRP Synthesis 311, Transportation Research Board, Washington D.C.
- SHRP2 (2014). Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability. Transportation Research Board.
- Sioui, L. (2014). Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable : concept, méthodes et outils, Thèse de doctorat (PhD), Département des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal, 416 pages.

- SOM. (2015). Sondage sur la satisfaction et les préoccupations de la population en transport, 104 pages.
- Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Nishinari, K., Tadaki, S., and Yukawa, S. (2008). Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, 10(3), 033001.
- Transport Canada (TC). (2006). Le coût de la congestion urbaine au Canada, 31 pages.
- Transportation Research Board (2010). Highway Capacity Manual 2010, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- Transports Québec. Autoroute 30 – Parachèvement. http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/grands_projets/grands_projets_terminees/p_parachevement_a30. Page consultée le 2013-11-28.
- Transports Québec. (2002). Guide de la codification et du mesurage du réseau routier, 58 pages.
- Turcotte, M. (2011). Se rendre au travail : résultats de l'Enquête sociale générale de 2010. Statistiques Canada.
- Van Tilburg, C. (2007). Traffic and congestion in the Roman Empire. Routledge, Abingdon.
- Wolniak, M. J., and S. Mahapatra (2014). Data and Performance Based Congestion Management Approach for Maryland Highways. Présenté au 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.

ANNEXES

Annexe 1 Vision de l'outil d'analyse et de suivi de la congestion

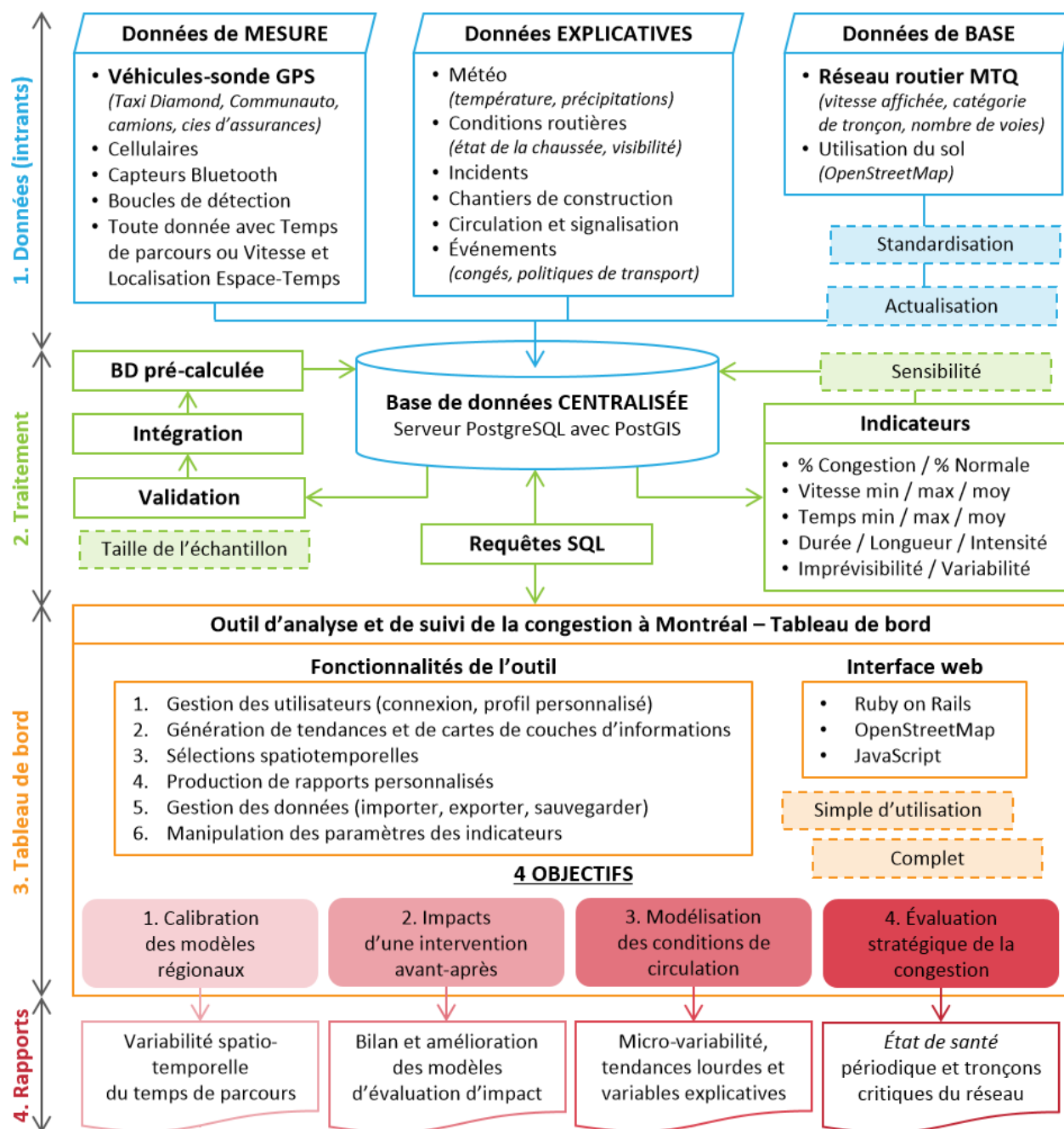


Figure A1-1 : Vision de l'architecture de l'outil d'analyse et de suivi de la congestion

Données de MESURE		Données de BASE		Données EXPLICATIVES			
Vitesse	Débit	Réseau routier	Utilisation sol	Météo	Travaux	Incidents	Événement
(GPS)	(Boucles)	(BGR)	(CMM)	(Env. Canada)	(SGE-Intervention)	(SAGE)	(à créer)
- Moyenne	- Volume	- No route	- Région	- Température	- Présence?	- Présence?	- Présence?
- Écart-type		- Direction	- Densité	- Pluie	- Type	- Type	- Type
- Nb observations		- Vitesse affichée		- Neige	- Limite de vitesse		
		- Type route		- Vitesse vent	- Nb voie dispo		
		- Nb voie		- Direction vent			
		- Largeur voie					

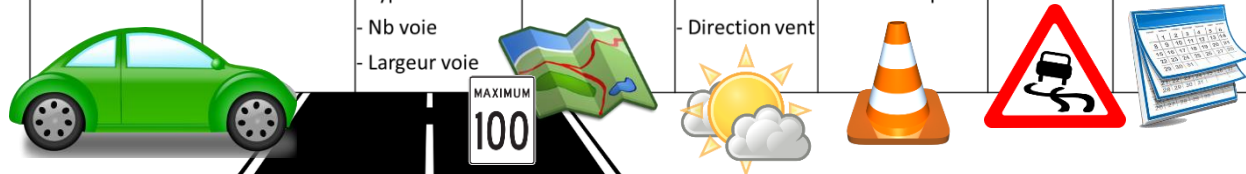


Figure A1-2 : Vision de la table de données maîtresse de l'outil

Annexe 2 Réseau routier détaillé

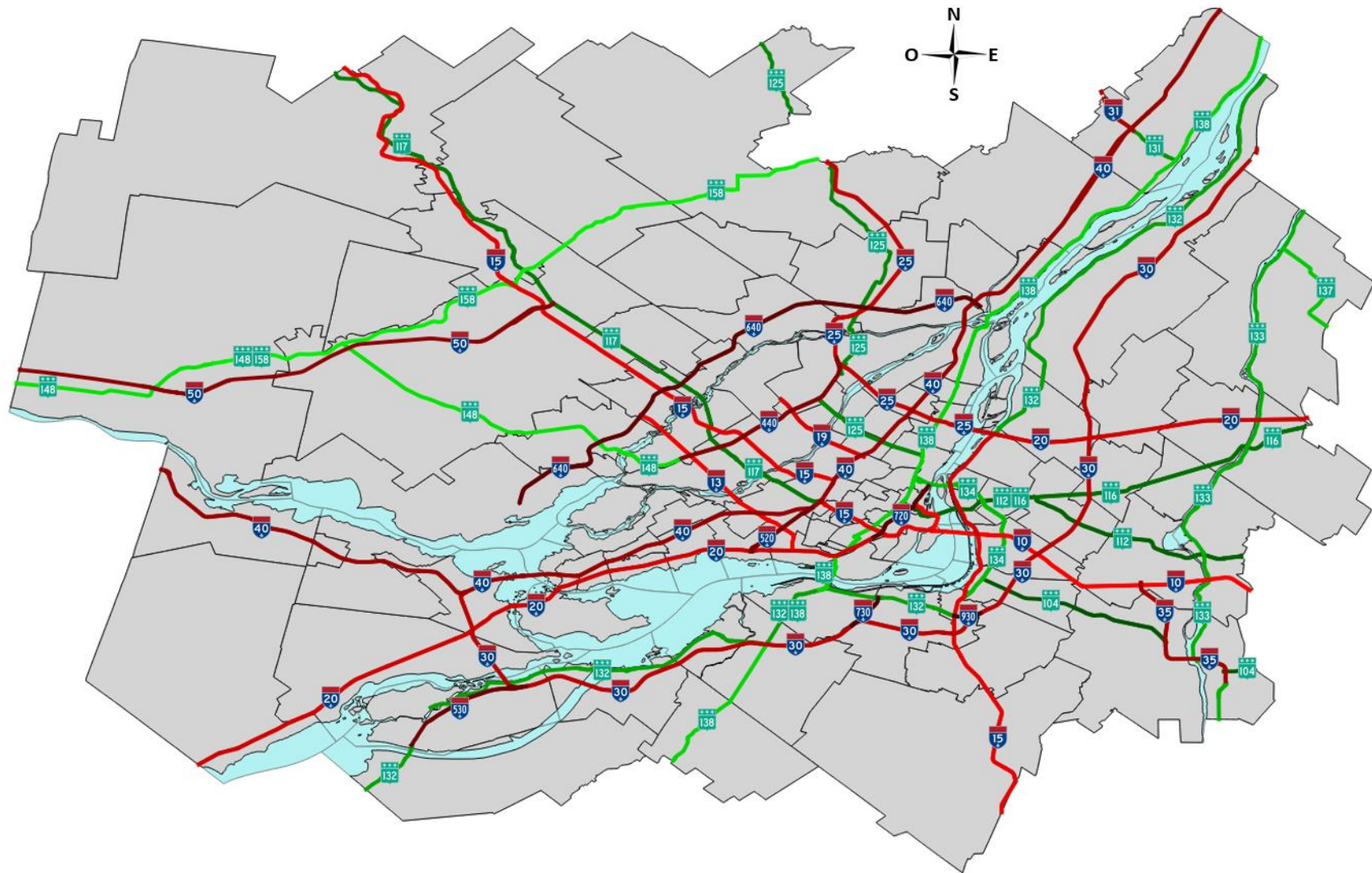


Figure A2-1 : Carte du réseau routier du MTQ de la région métropolitaine de Montréal avec la numérotation des routes



Figure A2-2 : Carte de la section centrale du réseau routier du MTQ de la région métropolitaine de Montréal et numérotation

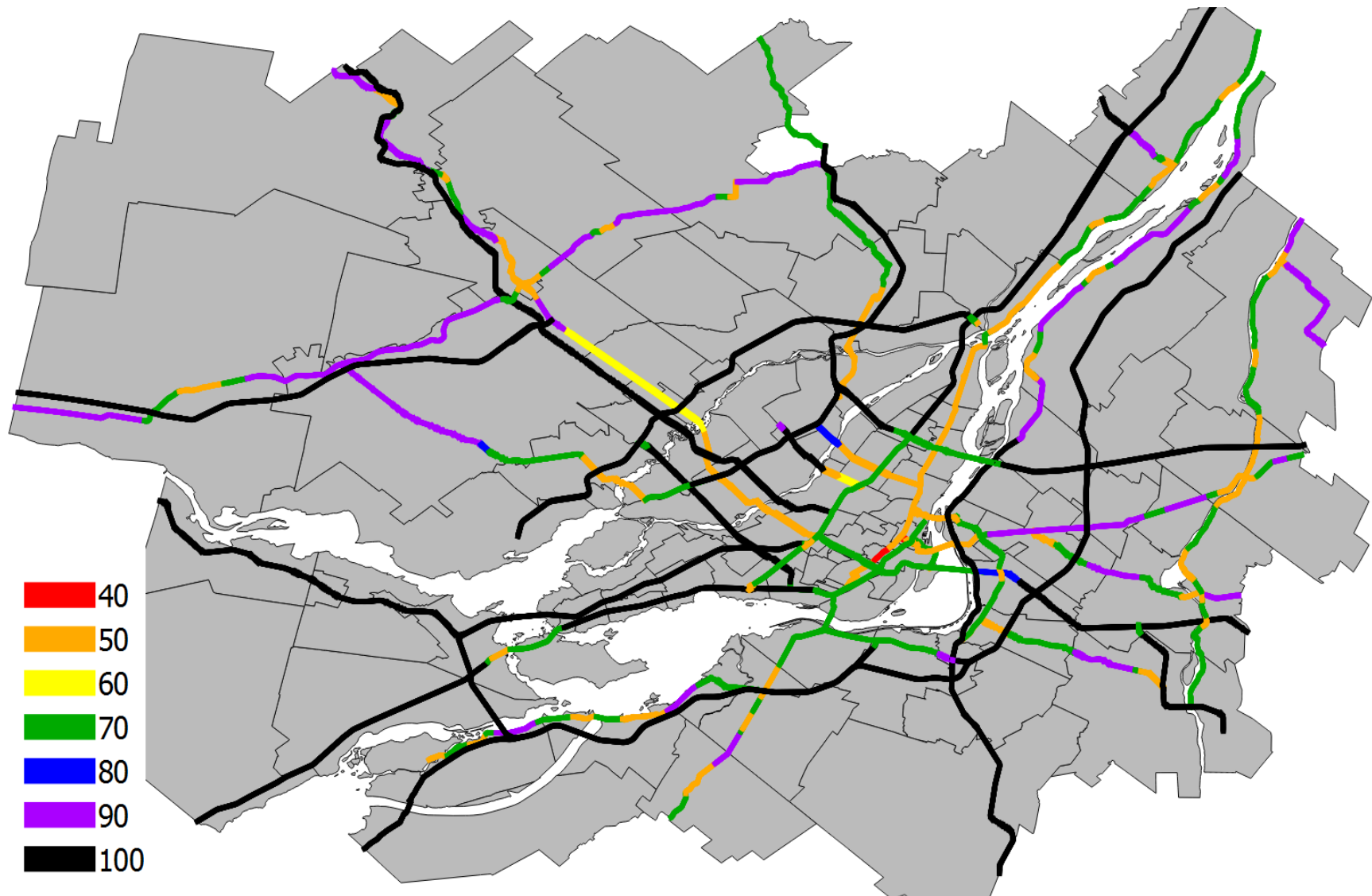


Figure A2-3 : Carte des limites de vitesse du réseau routier du MTQ de la région métropolitaine de Montréal

Annexe 3 Prototype de sondage sur la perception de la congestion

Ce prototype de sondage sur la perception de la congestion est inspiré des travaux de Bertini (2006). L'objectif est de sonder les automobilistes à savoir quel est leur seuil d'acceptabilité de la congestion routière.

Mise en contexte : Votre déplacement domicile-travail du matin en semaine en auto en général :
(Si vous ne savez pas ou vous ne voulez pas répondre, ne répondez pas)

Tableau A3-1 : Prototype de sondage sur la perception de la congestion

#	QUESTIONS (Choix de réponses)
1	Effectuez-vous ou avez-vous déjà effectué ce déplacement en auto? (Question test) Toujours, souvent, parfois, jamais
2	Pouvez-vous estimer les temps de parcours de ce déplacement en auto? Parfaitement, probablement, pas vraiment, aucunement
3	Dans quel intervalle de temps partez-vous le matin? 5h-5h30, 5h30-6h, 6h-6h30, 6h30-7h, 7h-7h30, 7h30-8h, 8h-8h30, 8h30-9h, 9h-9h30, 9h30-10h, Autres
4	Combien de temps dure ce déplacement en moyenne (temps planifié)? 10-20-30-40-50-1h-1h10-1h20-1h30-1h40-1h50-2h
5	Quelle portion de ce temps estimez-vous perdre à cause de la congestion? 10-20-30-40-50-1h-1h10-1h20-1h30-1h40-1h50-2h
6	Combien de temps additionnel tolérez-vous? 10-20-30-40-50-1h-1h10-1h20-1h30-1h40-1h50-2h <i>Par exemple, mon temps moyen est de 60min (Q4), dont la moitié, 30min (Q5), est du temps perdu à cause de la congestion, et je tolérerais un maximum de 10min de plus (Q6), donc un temps de parcours de 70min (Q4+Q6)</i>
7	Combien de temps partez-vous d'avance de votre domicile pour éviter ce retard? 10-20-30-40-50-1h-1h10-1h20-1h30-1h40-1h50-2h
8	À quelle fréquence votre temps de déplacement est-il supérieur de plus de 10min à votre temps planifié? Un jour sur deux (1/2), 1 fois par semaine (1/5), chaque 2 semaines (1/10), 1 fois par mois (1/20), jamais
9	Que serait votre réponse concernant votre déplacement PM travail-domicile moyen? Un jour sur deux (1/2), 1 fois par semaine (1/5), chaque 2 semaines (1/10), 1 fois par mois (1/20), jamais
10	Êtes-vous plus tolérant concernant votre déplacement PM travail-domicile? Plus tolérant en PM, indifférent, moins tolérant en PM

Tableau A3-1 : Prototype de sondage sur la perception de la congestion (suite)

#	QUESTIONS (Choix de réponses)
11	Considérez-vous que le fait de vous déplacer soit une perte de temps pour vous? Parfaitement, probablement, pas vraiment, aucunement
12	Quelle est la meilleure unité de mesure de la congestion? Débit, vitesse, temps de parcours, coûts, longueur de file
13	Quel est le seuil acceptable de la congestion (par rapport à la limite de vitesse)? 30% de la limite de vitesse, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%
14	Qu'est-ce qui cause le plus souvent la congestion? demande > capacité, les travaux, la météo, les accidents, les événements spéciaux, les feux de signalisation, les autres automobilistes
15	Qu'est-ce qui cause les pires congestions? demande > capacité, les travaux, la météo, les accidents, les événements spéciaux, les feux de signalisation, les autres automobilistes
16	Croyez-vous que le pont de l'A25 a eu un effet sur les conditions de circulation à Montréal? Oui un effet positif, Oui un effet négatif, Non aucun changement
17	Comment décririez-vous la congestion 2015 par rapport à la congestion de 2010? Meilleures conditions, aucun changement, pires conditions

Après avoir testé le sondage à deux reprises, sans obtenir de résultats concluants du au faible pourcentage d'automobilistes parmi les personnes sondées, quelques questions de contrôle supplémentaires ont été suggérées : Avez-vous enfants? Avez-vous un horaire variable?

Annexe 4 Résultats détaillés de l'évaluation des indicateurs

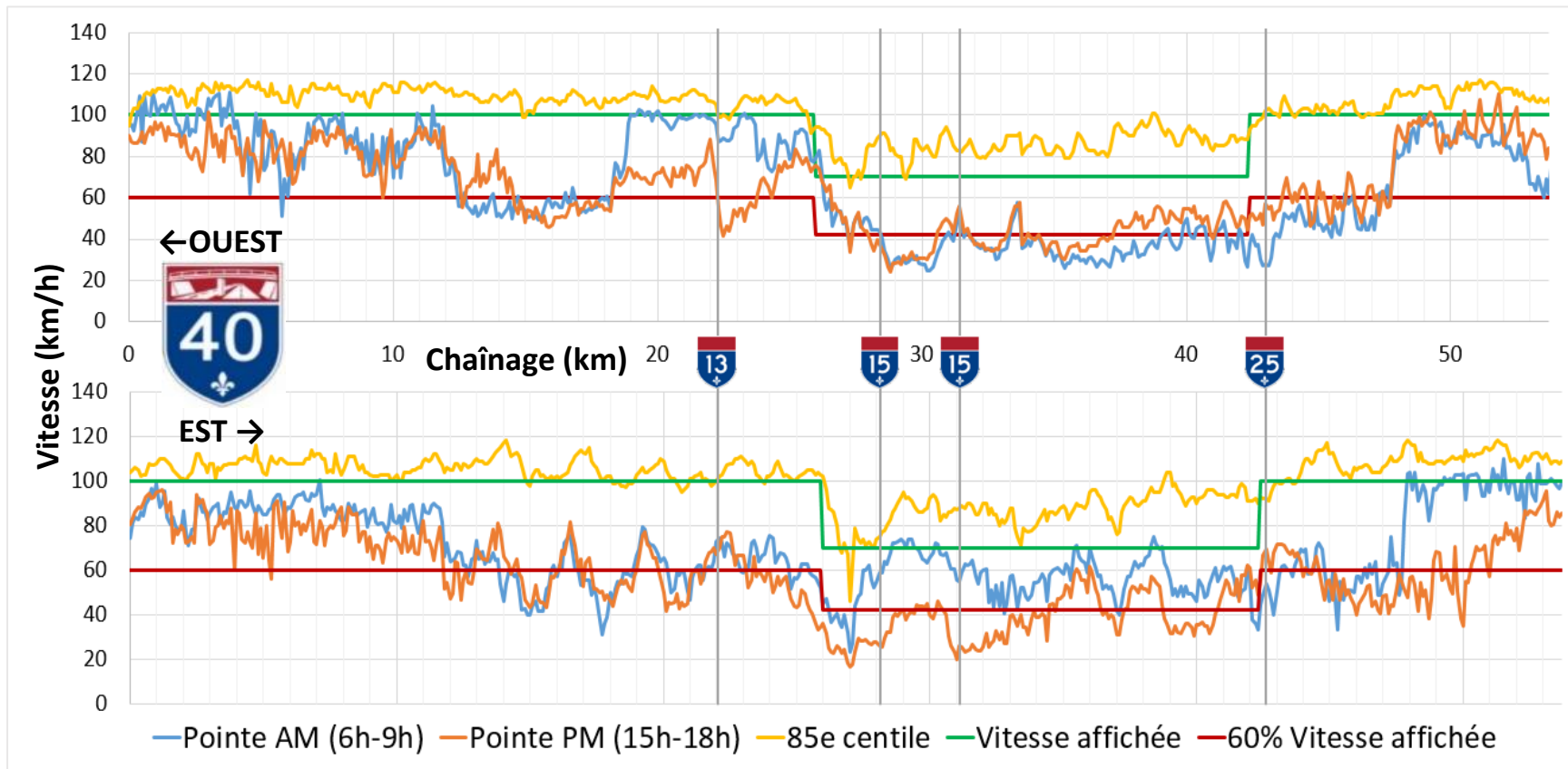


Figure A4-1 : Vitesse moyenne sur l'autoroute 40 par rapport à la limite de vitesse, au seuil de congestion et au 85e centile des vitesses agrégée par tronçon de 100 m

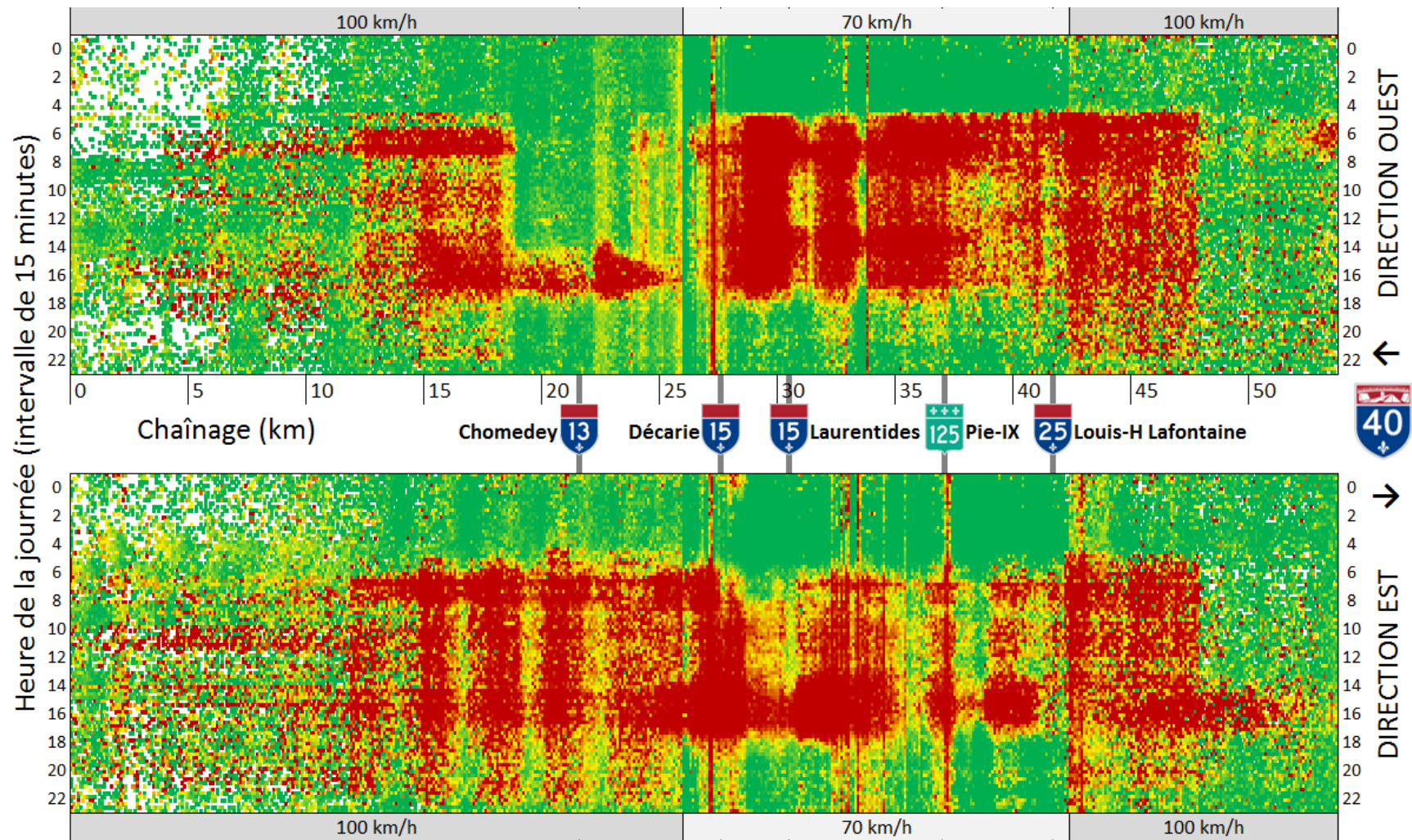


Figure A4-2 : Grille spatiotemporelle du Ratio de la limite de vitesse sur l'autoroute 40 de janvier 2012 à septembre 2013

Annexe 5 Résultats détaillés de la modélisation

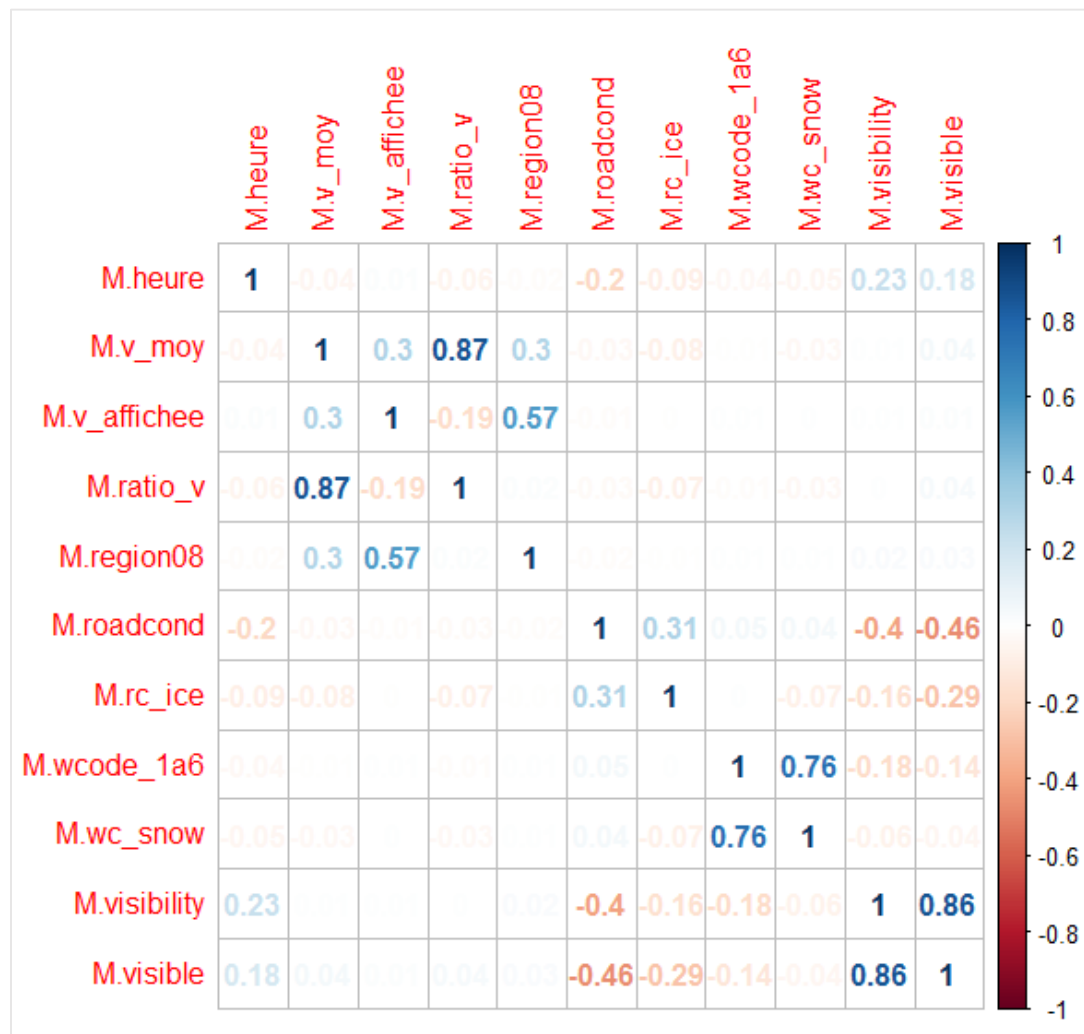


Figure A5-1 : Matrice de corrélation des variables utilisées pour mars 2014

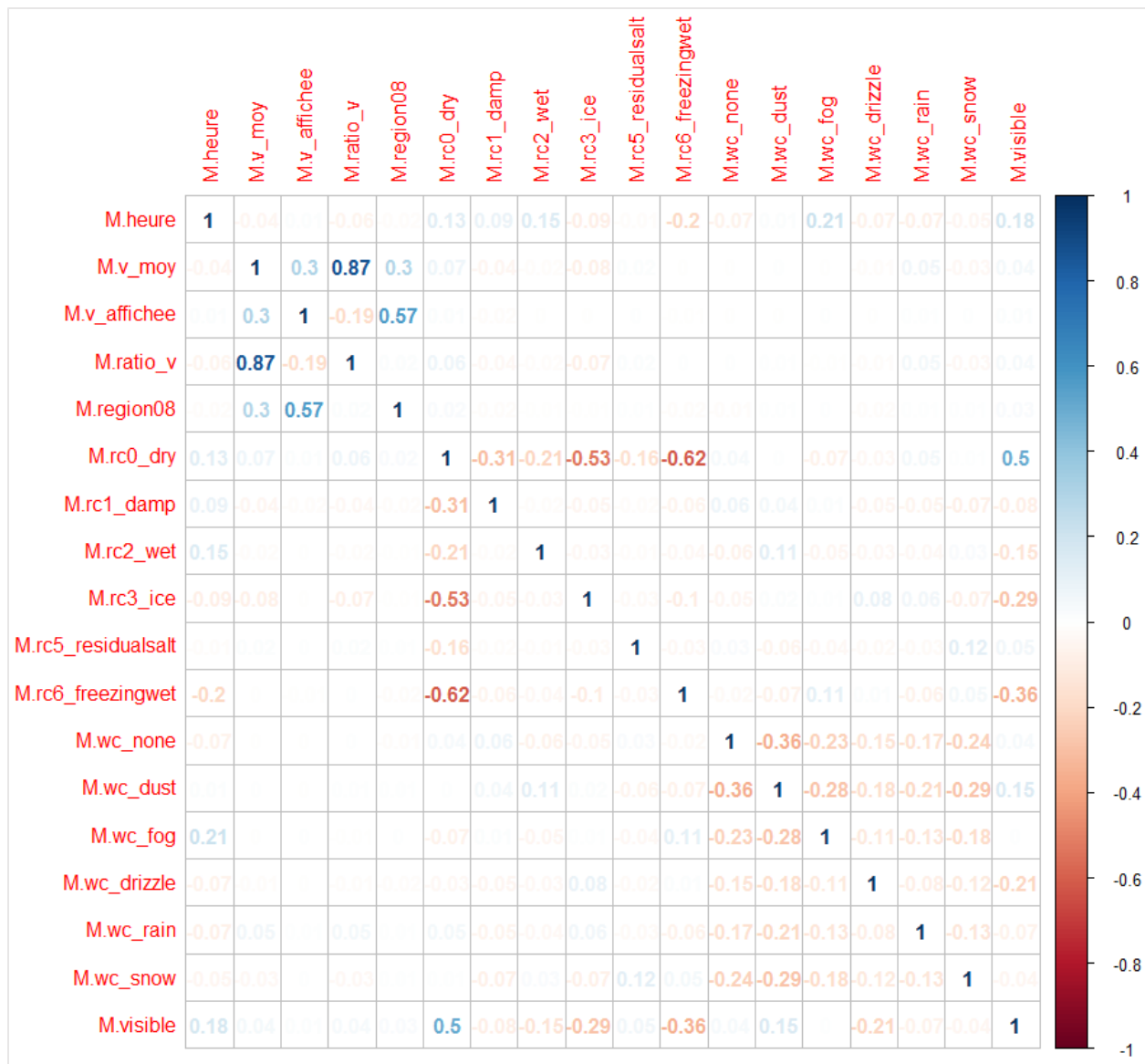


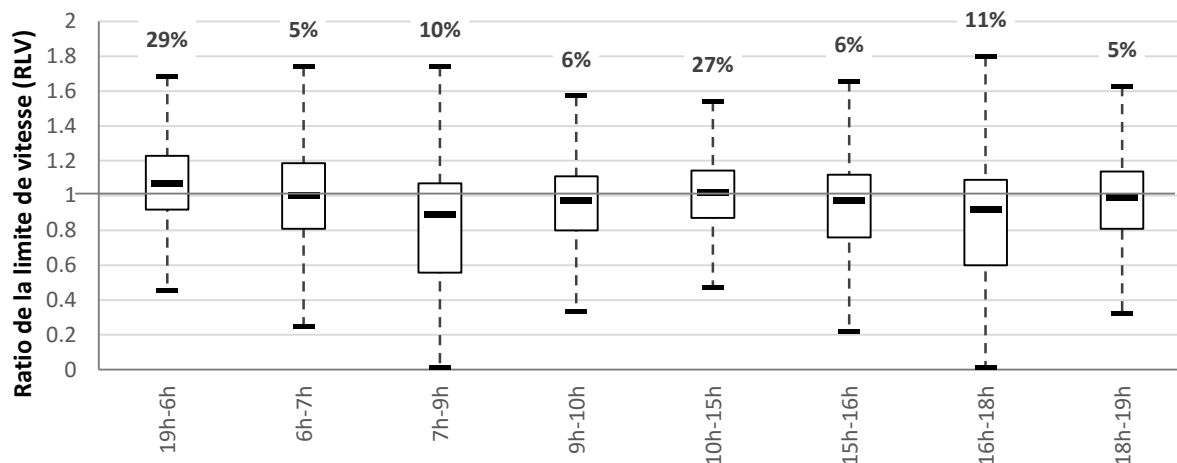
Figure A5-2 : Matrice de corrélation des conditions routières, conditions météo et intensité de pluie et neige avec les variables de circulation pour février 2014

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		0.028	0.047	0.048	0.078	0.035	0.092	0.249	0.253	0.194	0.147	0.146	0.119	0.117	0.142	0.169	0.203	0.22	0.159	0.079	0.068	0.074	0.063	0.058
1	0.028		0.038	0.04	0.061	0.02	0.118	0.273	0.277	0.184	0.135	0.132	0.108	0.104	0.13	0.165	0.226	0.243	0.145	0.068	0.058	0.064	0.061	0.042
2	0.047	0.038		0.062	0.088	0.037	0.099	0.258	0.264	0.17	0.122	0.117	0.095	0.092	0.118	0.149	0.212	0.233	0.13	0.044	0.039	0.038	0.043	0.069
3	0.048	0.04	0.062		0.036	0.052	0.135	0.293	0.297	0.221	0.173	0.171	0.145	0.142	0.167	0.2	0.246	0.263	0.184	0.096	0.089	0.09	0.095	0.059
4	0.078	0.061	0.088	0.036		0.069	0.168	0.322	0.325	0.241	0.194	0.187	0.164	0.162	0.188	0.22	0.275	0.293	0.199	0.115	0.105	0.11	0.113	0.082
5	0.035	0.02	0.037	0.052	0.069		0.119	0.279	0.284	0.174	0.127	0.126	0.098	0.097	0.121	0.157	0.233	0.253	0.139	0.067	0.057	0.063	0.048	0.055
6	0.092	0.118	0.099	0.135	0.168	0.119		0.16	0.168	0.111	0.07	0.07	0.083	0.09	0.058	0.089	0.115	0.135	0.076	0.128	0.131	0.108	0.078	0.146
7	0.249	0.273	0.258	0.293	0.322	0.279	0.16		0.025	0.156	0.226	0.23	0.242	0.25	0.191	0.122	0.049	0.03	0.157	0.285	0.291	0.268	0.236	0.301
8	0.253	0.277	0.264	0.297	0.325	0.284	0.168	0.025		0.163	0.234	0.234	0.247	0.255	0.197	0.126	0.065	0.045	0.165	0.288	0.296	0.273	0.241	0.306
9	0.194	0.184	0.17	0.221	0.241	0.174	0.111	0.156	0.163		0.075	0.089	0.099	0.109	0.063	0.042	0.109	0.132	0.046	0.158	0.156	0.142	0.135	0.208
10	0.147	0.135	0.122	0.173	0.194	0.127	0.07	0.226	0.234	0.075		0.017	0.033	0.036	0.039	0.109	0.179	0.201	0.071	0.095	0.099	0.094	0.088	0.156
11	0.146	0.132	0.117	0.171	0.187	0.126	0.07	0.23	0.234	0.089	0.017		0.029	0.03	0.042	0.108	0.185	0.204	0.076	0.09	0.094	0.087	0.086	0.15
12	0.119	0.108	0.095	0.145	0.164	0.098	0.083	0.242	0.247	0.099	0.033	0.029		0.013	0.054	0.121	0.197	0.216	0.089	0.066	0.07	0.066	0.059	0.125
13	0.117	0.104	0.092	0.142	0.162	0.097	0.09	0.25	0.255	0.109	0.036	0.03	0.013		0.061	0.129	0.204	0.225	0.095	0.067	0.069	0.062	0.057	0.122
14	0.142	0.13	0.118	0.167	0.188	0.121	0.058	0.191	0.197	0.063	0.039	0.042	0.054	0.061		0.072	0.145	0.166	0.039	0.104	0.103	0.088	0.082	0.148
15	0.169	0.165	0.149	0.2	0.22	0.157	0.089	0.122	0.126	0.042	0.109	0.108	0.121	0.129	0.072		0.077	0.096	0.04	0.165	0.17	0.148	0.116	0.197
16	0.203	0.226	0.212	0.246	0.275	0.233	0.115	0.049	0.065	0.109	0.179	0.185	0.197	0.204	0.145	0.077		0.028	0.112	0.239	0.245	0.221	0.189	0.253
17	0.22	0.243	0.233	0.263	0.293	0.253	0.135	0.03	0.045	0.132	0.201	0.204	0.216	0.225	0.166	0.096	0.028		0.132	0.258	0.264	0.242	0.211	0.271
18	0.159	0.145	0.13	0.184	0.199	0.139	0.076	0.157	0.165	0.046	0.071	0.076	0.089	0.095	0.039	0.04	0.112	0.132		0.14	0.139	0.115	0.099	0.173
19	0.079	0.068	0.044	0.096	0.115	0.067	0.128	0.285	0.288	0.158	0.095	0.09	0.066	0.067	0.104	0.165	0.239	0.258	0.14		0.013	0.039	0.059	0.065
20	0.068	0.058	0.039	0.089	0.105	0.057	0.131	0.291	0.296	0.156	0.099	0.094	0.07	0.069	0.103	0.17	0.245	0.264	0.139	0.013		0.037	0.06	0.06
21	0.074	0.064	0.038	0.09	0.11	0.063	0.108	0.268	0.273	0.142	0.094	0.087	0.066	0.062	0.088	0.148	0.221	0.242	0.115	0.039	0.037		0.034	0.084
22	0.063	0.061	0.043	0.095	0.113	0.048	0.078	0.236	0.241	0.135	0.088	0.086	0.059	0.057	0.082	0.116	0.189	0.211	0.099	0.059	0.06	0.034		0.095
23	0.058	0.042	0.069	0.059	0.082	0.055	0.146	0.301	0.306	0.208	0.156	0.15	0.125	0.122	0.148	0.197	0.253	0.271	0.173	0.065	0.06	0.084	0.095	

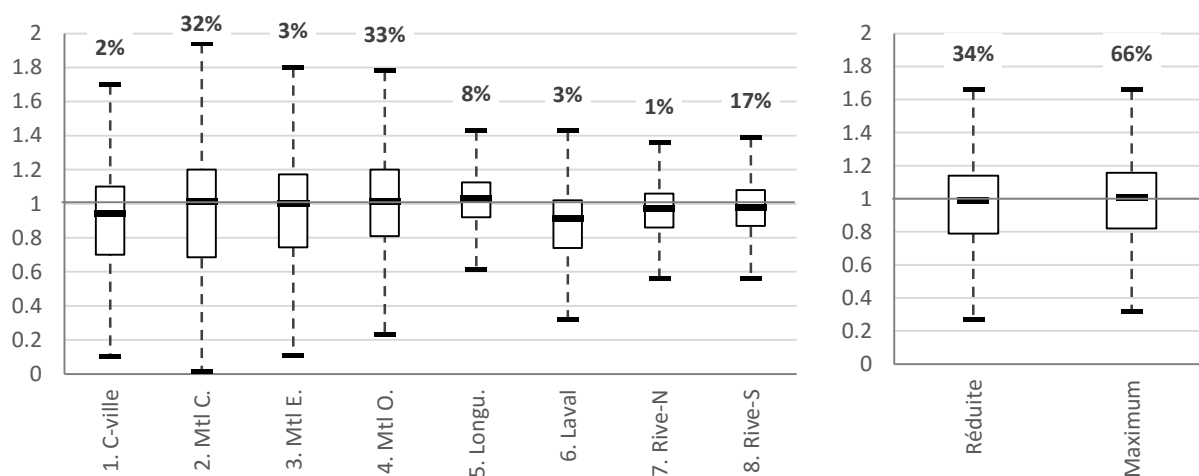
Figure A5-3 : Matrice des distances D entre les distributions de chaque paire d'heure pour le mois de février 2014

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
0		0.033	0.017	0.039	0.084	0.05	0.082	0.239	0.257	0.143	0.092	0.072	0.053	0.057	0.088	0.166	0.219	0.222	0.141	0.078	0.049	0.066	0.049	0.042
1	0.033		0.018	0.036	0.091	0.058	0.108	0.266	0.285	0.154	0.092	0.078	0.058	0.062	0.099	0.189	0.245	0.25	0.16	0.075	0.045	0.059	0.06	0.042
2	0.017	0.018		0.04	0.089	0.049	0.093	0.25	0.269	0.144	0.093	0.073	0.055	0.059	0.09	0.175	0.231	0.237	0.145	0.08	0.05	0.07	0.051	0.043
3	0.039	0.036	0.04		0.055	0.025	0.116	0.271	0.291	0.168	0.12	0.096	0.081	0.083	0.118	0.198	0.248	0.253	0.168	0.106	0.077	0.095	0.076	0.063
4	0.084	0.091	0.089	0.055		0.051	0.155	0.308	0.329	0.223	0.174	0.15	0.135	0.137	0.172	0.238	0.287	0.291	0.209	0.16	0.131	0.149	0.13	0.117
5	0.05	0.058	0.049	0.025	0.051		0.123	0.276	0.298	0.188	0.134	0.117	0.096	0.099	0.128	0.207	0.255	0.26	0.181	0.124	0.093	0.11	0.093	0.087
6	0.082	0.108	0.093	0.116	0.155	0.123		0.159	0.184	0.107	0.058	0.034	0.072	0.071	0.057	0.105	0.147	0.152	0.083	0.044	0.074	0.071	0.056	0.068
7	0.239	0.266	0.25	0.271	0.308	0.276	0.159		0.049	0.113	0.175	0.189	0.227	0.224	0.168	0.079	0.028	0.032	0.107	0.199	0.231	0.229	0.213	0.227
8	0.257	0.285	0.269	0.291	0.329	0.298	0.184	0.049		0.133	0.196	0.209	0.248	0.245	0.187	0.1	0.055	0.052	0.128	0.219	0.251	0.248	0.237	0.247
9	0.143	0.154	0.144	0.168	0.223	0.188	0.107	0.113	0.133		0.065	0.079	0.12	0.121	0.066	0.037	0.094	0.099	0.027	0.088	0.12	0.116	0.106	0.115
10	0.092	0.092	0.093	0.12	0.174	0.134	0.058	0.175	0.196	0.065		0.026	0.058	0.061	0.014	0.101	0.155	0.159	0.071	0.027	0.056	0.055	0.049	0.06
11	0.072	0.078	0.073	0.096	0.15	0.117	0.034	0.189	0.209	0.079	0.026		0.043	0.044	0.023	0.114	0.17	0.174	0.084	0.028	0.049	0.044	0.043	0.051
12	0.053	0.058	0.055	0.081	0.135	0.096	0.072	0.227	0.248	0.12	0.058	0.043		0.008	0.062	0.154	0.205	0.21	0.124	0.051	0.035	0.03	0.028	0.034
13	0.057	0.062	0.059	0.083	0.137	0.099	0.071	0.224	0.245	0.121	0.061	0.044	0.008		0.059	0.154	0.202	0.207	0.124	0.053	0.04	0.033	0.029	0.04
14	0.088	0.099	0.09	0.118	0.172	0.128	0.057	0.168	0.187	0.066	0.014	0.023	0.062	0.059		0.094	0.147	0.151	0.066	0.035	0.064	0.063	0.058	0.063
15	0.166	0.189	0.175	0.198	0.238	0.207	0.105	0.079	0.1	0.037	0.101	0.114	0.154	0.154	0.094		0.062	0.069	0.031	0.122	0.155	0.15	0.137	0.149
16	0.219	0.245	0.231	0.248	0.287	0.255	0.147	0.028	0.055	0.094	0.155	0.17	0.205	0.202	0.147	0.062		0.009	0.09	0.181	0.21	0.209	0.199	0.208
17	0.222	0.25	0.237	0.253	0.291	0.26	0.152	0.032	0.052	0.099	0.159	0.174	0.21	0.207	0.151	0.069	0.009		0.094	0.185	0.214	0.213	0.204	0.212
18	0.141	0.16	0.145	0.168	0.209	0.181	0.083	0.107	0.128	0.027	0.071	0.084	0.124	0.124	0.066	0.031	0.09	0.094		0.093	0.126	0.123	0.11	0.12
19	0.078	0.075	0.08	0.106	0.16	0.124	0.044	0.199	0.219	0.088	0.027	0.028	0.051	0.053	0.035	0.122	0.181	0.185	0.093		0.041	0.031	0.034	0.045
20	0.049	0.045	0.05	0.077	0.131	0.093	0.074	0.231	0.251	0.12	0.056	0.049	0.035	0.04	0.064	0.155	0.21	0.214	0.126	0.041		0.022	0.025	0.02
21	0.066	0.059	0.07	0.095	0.149	0.11	0.071	0.229	0.248	0.116	0.055	0.044	0.03	0.033	0.063	0.15	0.209	0.213	0.123	0.031	0.022		0.02	0.034
22	0.049	0.06	0.051	0.076	0.13	0.093	0.056	0.213	0.237	0.106	0.049	0.043	0.028	0.029	0.058	0.137	0.199	0.204	0.11	0.034	0.025	0.02		0.018
23	0.042	0.042	0.043	0.063	0.117	0.087	0.068	0.227	0.247	0.115	0.06	0.051	0.034	0.04	0.063	0.149	0.208	0.212	0.12	0.045	0.02	0.034	0.018	

Figure A5-4 : Matrice des distances D entre les distributions de chaque paire d'heure pour le mois de mars 2014

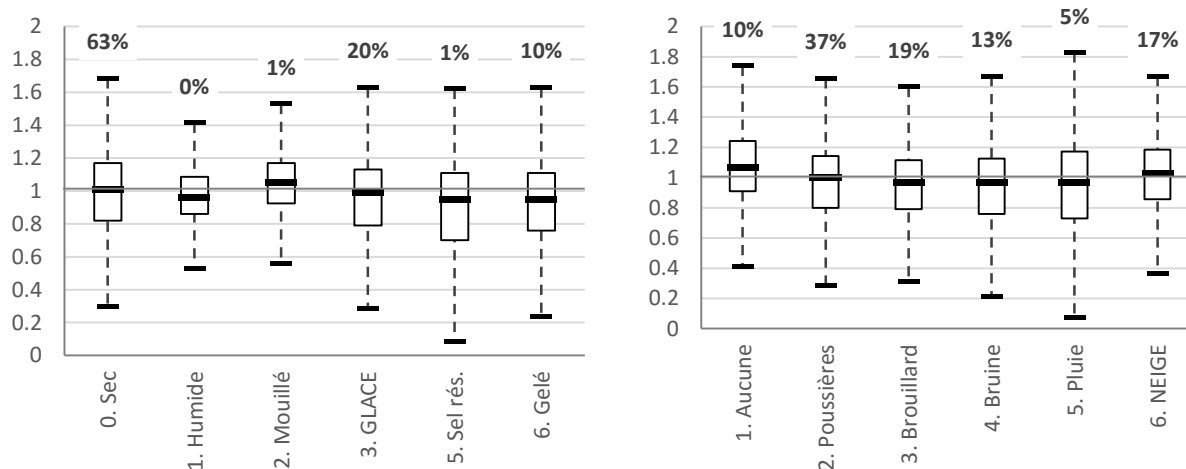


(a) Distribution du RLV selon la période horaire



(b) Distribution du RLV selon la région

(c) RLV selon la visibilité



(d) RLV selon les conditions routières

(e) RLV selon les conditions météo

Figure A5-5 : Distributions des données du RLV en fonction de toutes les variables pour le mois de mars 2014 (631 269 observations)

Scripts R utilisés pour produire les résultats

```
#Librairies pseudo-R2 et corrplot
library("pscl", lib.loc=~R/win-library/3.2")
library("corrplot", lib.loc=~R/win-library/3.2")

#Envoyer les resultats dans un fichier TXT
sink("C:\\DATA\\SMR_2014_SteTherese\\resultats_memoire.txt")

#Procédure modeles FEVRIER

#Importer et attacher la base de donnees
bd_x_fev <- read.csv("C:\\DATA\\SMR_2014_SteTherese\\bd_x_fev.csv", header = TRUE, sep = ",", dec = ".")
attach(bd_x_fev)
F <- bd_x_fev

#Generer une variable pour chaque periode horaire
F$h[heure >= 19 | heure < 6] <- "1_19h-6h"
F$h[heure >= 6 & heure < 7] <- "2_6h-7h"
F$h[heure >= 7 & heure < 9] <- "3_7h-9h"
F$h[heure >= 9 & heure < 10] <- "4_9h-10h"
F$h[heure >= 10 & heure < 15] <- "5_10h-15h"
F$h[heure >= 15 & heure < 16] <- "6_15h-16h"
F$h[heure >= 16 & heure < 18] <- "7_16h-18h"
F$h[heure >= 18 & heure < 19] <- "8_18h-19h"

#Generer une variable pour chaque region
F$reg[region08 == 1] <- "1_mtl downtown"
F$reg[region08 == 2] <- "2_mtl centr"
F$reg[region08 == 3] <- "3_mtl east"
F$reg[region08 == 4] <- "4_mtl west"
F$reg[region08 == 5] <- "5_longu"
F$reg[region08 == 6] <- "6_laval"
F$reg[region08 == 7] <- "7_norths"
F$reg[region08 == 8] <- "8_souths"

#Generer une variable pour chaque element meteo
F$rc_ice <- as.numeric(roadcond == 3) #Chaussee glacee
F$wc_snow <- as.numeric(wcode_1a6 == 6) #Precipitation de neige
F$visible <- as.numeric(visibility == 3.1) #Bonne visibilite

#Generer une variable pour chaque seuil de congestion
F$congestion10 <- as.numeric(ratio_v < 0.1)
F$congestion20 <- as.numeric(ratio_v < 0.2)
...
F$congestion100 <- as.numeric(ratio_v < 1.0)

#Matrice de correlation des variables
corbdf <- data.frame(F$h, F$v_moy, F$v_affichee, F$ratio_v, F$region08, F$roadcond, F$rc_ice, F$wcode_1a6,
F$wc_snow, F$visibility, F$visible)
corrF <- cor(corbdf)
corrplot(corrF, method = c("number"))
#corrplot(corrF, method = c("circle"))

#Creation du modele LOGIT 1
logitF01 <- glm(F$congestion60 ~ F$h + F$reg + F$rc_ice + F$wc_snow + F$visible, family=binomial)

#Calcul des statistiques usuelles et les pseudo-R2
summary(logitF01)
pR2(logitF01)

#Creation des modeles LOGIT avec differents seuils de congestion
Sys.time()
logitF10 <- glm(F$congestion10 ~ F$h + F$reg + F$rc_ice + F$wc_snow + F$visible, family=binomial)
summary(logitF10)
pR2(logitF10)
logitF20 <- glm(F$congestion20 ~ F$h + F$reg + F$rc_ice + F$wc_snow + F$visible, family=binomial)
summary(logitF20)
pR2(logitF20)
...
summary(logitF100)
pR2(logitF100)
Sys.time()
```



```
#####
```

```
#Procédure modèles MARS
```

```
#Importer et attacher la base de données
```

```
bd_z_mars <- read.csv("C:\\DATA\\SMR_2014_SteTherese\\bd_z_mars.csv", header = TRUE, sep = ",", dec = ".")
attach(bd_z_mars)
M <- bd_z_mars
```

```
#Generer une variable pour chaque periode horaire
```

```
M$h[heure >= 19 | heure < 6] <- "1_19h-6h"
M$h[heure >= 6 & heure < 7] <- "2_6h-7h"
M$h[heure >= 7 & heure < 9] <- "3_7h-9h"
M$h[heure >= 9 & heure < 10] <- "4_9h-10h"
M$h[heure >= 10 & heure < 15] <- "5_10h-15h"
M$h[heure >= 15 & heure < 16] <- "6_15h-16h"
M$h[heure >= 16 & heure < 18] <- "7_16h-18h"
M$h[heure >= 18 & heure < 19] <- "8_18h-19h"
```

```
#Generer une variable pour chaque region
```

```
M$reg[region08 == 1] <- "1_mtl downtown"
M$reg[region08 == 2] <- "2_mtl centr"
M$reg[region08 == 3] <- "3_mtl east"
M$reg[region08 == 4] <- "4_mtl west"
M$reg[region08 == 5] <- "5_longu"
M$reg[region08 == 6] <- "6_laval"
M$reg[region08 == 7] <- "7_norths"
M$reg[region08 == 8] <- "8_souths"
```

```
#Generer une variable pour chaque element meteo
```

```
M$rc_ice <- as.numeric(roadcond == 3) #Chaussee glacee
M$wc_snow <- as.numeric(wcode_1a6 == 6) #Precipitation de neige
M$visible <- as.numeric(visibility == 3.1) #Bonne visibilite
```

```
#Generer une variable pour chaque seuil de congestion
```

```
M$congestion10 <- as.numeric(ratio_v < 0.1)
M$congestion20 <- as.numeric(ratio_v < 0.2)
...
M$congestion100 <- as.numeric(ratio_v < 1.0)
```

```
#Matrice de correlation des variables
```

```
corbDM <- data.frame(M$h, M$reg, M$rc_ice, M$wc_snow, M$visible, M$ratio_v, M$region08, M$roadcond, M$rc_ice, M$wcode_1a6,
M$wc_snow, M$visibility, M$visible)
corrM <- cor(corbDM)
corrplot(corrM, method = c("number"))
#corrplot(corrM, method = c("circle"))
```

```
#Creation du modele LOGIT 1
```

```
logitM01 <- glm(M$congestion60 ~ M$h + M$reg + M$rc_ice + M$wc_snow + M$visible, family=binomial)
```

```
#Calcul des statistiques usuelles et les pseudo-R2
```

```
summary(logitM01)
pR2(logitM01)
```

```
#Creation des modeles LOGIT avec differents seuils de congestion
```

```
Sys.time()
logitM10 <- glm(M$congestion10 ~ M$h + M$reg + M$rc_ice + M$wc_snow + M$visible, family=binomial)
summary(logitM10)
pR2(logitM10)
logitM20 <- glm(M$congestion20 ~ M$h + M$reg + M$rc_ice + M$wc_snow + M$visible, family=binomial)
summary(logitM20)
...
logitM100 <- glm(M$congestion100 ~ M$h + M$reg + M$rc_ice + M$wc_snow + M$visible, family=binomial)
summary(logitM100)
pR2(logitM100)
Sys.time()
```